

ŘADA B  
PRO KONSTRUKTÉRY  
ČASOPIS  
PRO RADIOTECHNIKU  
A AMATÉRSKÉ VYSÍLÁNÍ  
ROČNÍK XXVI/1977 ČÍSLO 3

## V TOMTO SEŠITĚ

Jak dál ve Svazarmu . . . . . 81

## ELEKTRONICKÁ HUDA

Fyzikální vlastnosti zvukových signálů . . . . .

Zvuk, tón . . . . . 82

Výška tónu . . . . . 82

Zvukové zábarvení . . . . . 82

Dynamika . . . . . 83

Časový průběh . . . . . 83

Základy hudební teorie . . . . .

Druhy ladění . . . . . 84

Oktáva, ustálené uspořádání . . . . .

klaviatury . . . . . 85

Stupnice, akordy . . . . . 85

Stabilita ladění . . . . . 85

Elektronické syntéza barvy zvuku . . . . .

Rozbor spektra základních . . . . .

periodických signálů . . . . . 86

Způsoby využití základních . . . . .

signálů . . . . . 86

Elektronické hudební nástroje . . . . .

Ohlédnutí do historie . . . . . 87

Druhy elektronických nástrojů . . . . . 87

Jednohlasé elektronické . . . . .

nástroje . . . . . 88

Nástroje vícehlasé . . . . . 93

Polyfonické nástroje . . . . . 96

Syntetizéry . . . . . 106

Elektronické vytváření efektů . . . . . 107

Problémy systémového a obvodového . . . . .

návrhu . . . . . 109

Koncepte nástroje . . . . .

Funkce a vlastnosti dílčích . . . . .

obvodů . . . . . 110

Celkové schéma nástroje . . . . . 116

Vlastní konstrukce nástroje . . . . .

Mechanická koncepce . . . . . 119

## AMATÉRSKÉ RADIO ŘADA B

Vydává ÚV Svazarmu ve vydavatelství Magnet, idslavova 26, PSČ 113 66 Praha 1, telefon 06 57-1. Šéfredaktor Ing. F. Smolík, zástupce boš Kalousek. Reditářka: K. Bartoš, V. Brzák, Donát, A. Glanc, I. Harminc, L. Hlinský, P. Horák, Hradíšek, Ing. J. T. Hyen, Ing. J. Jaroš, doc. Ing. Joachim, Ing. F. Králik, prom. fyz. L. Kryška, PhDr. Křížek, Ing. I. Lubomírský, K. Novák, Ing. O. Petrák, Ing. J. Vackář, CSc., laureát st. ceny KG, J. J. Zima, J. Ženíšek, laureát st. ceny KG. Redakce: Černá 24, PSČ 113 66 Praha 1, telefon 06 51-7, šéfred. linka 354, redaktor I. 353. čně vydá 6 čísel. Cena výtisku 5 Kčs, celoří pøedplatné 30 Kčs. Rozšířuje PNS, v jednotech ozbrojených sil vydavatelství Magnet, ministráce Vladislavova 26, Praha 1. Objednávky přijímá každá pošta i doručovatel. hlédací pošta Praha 07. Objednávky do zahraničí využíve PNS, vývoz tisku, Jindřišská 14, Praha 1. Články Naše vojsko, n. p., závod 08, 162 00 Praha 1, Liboc, Vlastina 710. Inzerci přijímá vydavatelství Magnet, Vladislavova 26, PSČ 113 66 Praha 1, telefon 26 06 51-7, linka 294. Za pùvodnost a správnost pøevku ručí autor. Návštěvy v redakci a telefonáty pouze po 14 hodině. Číslo indexu

o výšce 6. května 1977

vydavatelství MAGNET, Praha

## Jak dál ve Svazarmu

K politickému a spoleèenskému životu naší socialistické spoleènosti patří jako jedna z nejvýznamnějších složek spoleèenské organizace, sdružené v Národní frontě. Aby tyto organizace mohly plnit svoje poslání v rámci socialistické demokracie, je třeba, aby každá z nich měla svůj program, který by odpovídal jak celospoleèenským potřebám, tak i potřebám členů této organizace.

Mezi nejdůležitější spoleèenské organizace patří nesporně i Svazarm, Svaz pro spolupráci s armádou; jako vlastenecká branána organizace. Aby se dále posílila spoleèenská funkce Svazarmu ve smyslu usnesení předsednictva ÚV KSC, bylo Svazarmu uloženo, aby každá z jeho odborností (motoristé, letci, radioamatéři atd.) vypracovala svůj vlastní program, v němž by byly zachyceny nejpodstatnější směry rozvoje organizace. Proto vznikla koncepce radistické činnosti ve Svazarmu, jejíž přesné znění uveřejňuje redakce v AR řady A a k níž se vracíme v úvodních AR řady B komentářem.

Radisté ve Svazarmu mají za 25 let své činnosti mnoho zkušeností, dosáhli mnoha úspěchů, ale měli i problémy. Proto se při zpracování koncepce radistické činnosti vyházelo z závěr XV. sjezdu KSC, zejména pokud se týkaly oblasti rozvoje, prohlubování a uspokojování zájmu pracujících a prohlubování masového vlivu jednotlivých organizací Národní fronty. Přihlídalo se i v duchu záměru strany, jako vedoucí složky naší spoleènosti, k závěrům jednání ÚV KSC z července 1973 k socialistické výchově mladé generace, které byly konkretizovány 5. sjezdem Svazarmu. Protože žijeme v době nástupu vědeckotechnické revoluce, muselo se při vypracování koncepce přihlízet i k této skuteènosti, jak ji charakterizovaly závěry zasedání ÚV KSC z května 1974 k vědeckotechnickému rozvoji v národním hospodářství, které byly rozpracovány 3. zasedáním ÚV Svazarmu.

K vypracování koncepce koneèně přispěla i nutnost komplexně řešit otázky náplně odborné technické složky branné výchovy ve Svazarmu v duchu usnesení předsednictva ÚV KSC o Jednotném systému branné výchovy obyvatelstva.

Vím tím byl dán předpoklad k tomu, že koncepce radistické činnosti bude v souladu s požadavky celospoleèenské potřeby a že se bude radistika ubírat tím směrem, který je potřebný a nutný.

V této úvodní části, zachycující nejdůležitější všeobecné zásady, z nichž zpracovatele koncepce vycházejí, je třeba ještě uvést i to, na co byl při zpracování koncepce položen největší důraz, pokud jde o požadavky na Svazarm, o mládež a o počet členů naší organizace. Koncepce totiž musela vystihnout i takové skuteènosti, jako nárůst požadavků na technické znalosti pracujících – netechniků, a to v souvislosti s prodlužováním volného času, v souvislosti se zvyšujícími se požadavky na obsluhu moderních vojenských zařízení (v tomto bodu je především třeba podchytit a usměrnit zájmy mládeže „pøedvojenského“ věku); u pracujících – techniků umožnit prohlubování dosud nabývajících znalostí a zkušeností a podchytit vznik a růst nových specifických zájmů (jichž několik přibývá každým rokem) v oblasti vojenské, prùmyslové a spotřební elektroniky. A koneèně bylo třeba se zamyslet i nad žadoucím vztahem mezi masovostí a užší specializací; nad koncepcí radistických sportů, jako je hóna lišku, telegrafie, radistický víceboj atd., což jsou sporty, jejichž náplň má

úzký vztah jak k pøedvojenské přípravě specialistù v oboru radistiky pro armádu, tak i k „udržování se ve formě“ u vojáku v záloze.

Pøitom všem bylo třeba, aby koncepce, vzhledem ke své dlouhodobé platnosti, umožnila prùžné vnášet do své podstaty a do svého obsahu všechny nové jevy, které vývoj elektroniky (a nakonec i vývoj spoleènosti) přináší do spoleèenských procesù a tím i do činnosti Svazarmu.

To jsou tedy všechna podstatná východiska, z nichž se při vypracování koncepce vycházel. Na závìr tohoto struèeného výčtu východisek bylo myslím třeba dodat, že koncepce byla koncem minulého roku dokonèena a zaèátkem roku schválena ÚV KSC jako základní dokument k rozvoji radistiké činnosti ve Svazarmu.

Protože při návrhu plánu činnosti je vždy třeba vycházet ze souèasného stavu a stanovit si cíle, které by byly reálné (což bez zhodnocení souèasného stavu nelze, nebo lze pouze težko), je souèástí návrhu koncepce i kapitola o souèasnému stavu radistiké činnosti ve Svazarmu. Kdo tèe AR pravidelně, ví z drobných zpráv i z delších reportáží z hnutí a z fotografií na obálkách, které dokumentují činnost jednotlivých organizací Svazarmu, jak asi vypadá v souèasné dobì činnost prùmìrné svazarmovské organizace. Z reportáží z expedic redakce AR po republice i v ì, jak asi vypadá činnost tèech nejlepších organizací. Z otíštěných zpráv a reportáží je zřejmè, že nejlepších výsledkù dosáhly svazarmovské organizace i jejich nadízené složky tehdy, rozvíjela-li se jejich činnost v jednotlivých politické a odborné, sledovala-li hlavní cíle výchovy socialistického človèka – budovatele a obránce vlasti. Z reportáží je zřejmè, že Svazarm, jako dobrovolná branná spoleèenská organizace, dosáhl řady pozitivních výsledkù v rozšírování zájmu občanù a zejména pak mládeže o elektroniku, získal mnoho mladých lidí do výcviku v rámci přípravy na službu v armádě, umožnil nejlepším z nejlepších reprezentovat naší socialistickou republiku na mezinárodních závodech, v nichž naši sportovci byli vždy meziøídelní atd. Nejpodstatnější však je, že Svazarm podstatně a ve shodì s celosvìtovým trendem postupnì spojil individuální a úzce zájmovou činnost – radistiku – s celospoleèenskými zájmy, s brannými cíli, obohatil ji obsahové v souladu s vývojem radistiky a elektroniky a vyuvinul velké úsilí k tomu, aby radistika a elektronika „pøešla do krve“ co nejvètší části obyvatelstva. Jako správné se ukázalo i založení kolektivních radiostanic, protože, jak jistè každý výtmová práce je v dnešní dobì téměř nezbytná, jedinec vètinou není (a snad to ani není v jeho silách), schopen zvládnout teoreticky i prakticky celou oblast technického oboru, který se rozvíjí tak rychle, jako elektronika.

V koncepci šlo proto také o to, jak podporit týmovou práci, jak sìrit technické znalosti v souvislosti s vědeckotechnickou revolucí a to navíc přitažlivou formou, jak rozvíjet zájmovou technickou činnost tak, aby se dò ní zapojilo co možno nejvètší množství mladých lidí a jak pracovat v oblasti vrcholového sportu a plnit přitom heslo „Za masovost – za rekordy“.

(Pokraèování)

# Elektronické hudební nástroje

František Kyrš

Přesto, že historie aplikací elektronických nebo elektromechanických systémů v konstrukci hudebních nástrojů sahá prakticky až do počátku našeho století, používají se nástroje tohoto typu u nás dosud spíše výjimečně (nejčastěji majetnější hudební skupiny). Pro domácí, zájmové provozování hudby se přes řadu výhodných vlastností dosud výrazněji neprosadily. Nejzávažnějším omezením jsou jistě přede vším vysoké, rádové desetitisícevé ceny nástrojů, dostupných na našem trhu. V zahraničí je situace poněkud jiná. Sortiment výrobců elektronických hudebních nástrojů je rozsáhlý, od nejjednodušších jednohlávkových hraček až po nekolikamanuálové giganty (včetně stavebnic, nabízených k amatérské kompletaci). Při konstrukci těchto nástrojů, zvláště v posledním desetiletí, se využívají progresivních a často i speciálních konstrukčních prvků, u nás dosud nedostupných. Amatérská stavba i jednoduchého nástroje v našich podmírkách naráží od počátku na řadu problémů, ať již s obstáváním materiálů nebo součástí, či v technické nebo „ekonomické“ oblasti.

Starší harcovníci tvrdí, že kdo „uvízne drápkem“, má postaráno o zábanu na celý život. I když je to tvrzení poněkud nadneseňné, je v něm současně i kus pravdy – stavba kvalitního nástroje vyžaduje dokonalou znalost problematiky a určité přístrojové i díleneské vybavení stejně jako manuální zručnost. Konstrukce je obvykle poměrně náročná i časově, ceny polovodičových prvků a zvláště integrovanych obvodů pak hrozí vydrancováním rodinné podkladny. Realizovat velké nástroje varhanového typu může zatím protojen skutečně úzký okruh konstruktérů. Přesto se u nás elektronické hudební nástroje v nejrůznějších variantách staví a staví se dobré. Důvody, jsou zřejmě, navíc se jedná o perspektivní a zajímavý konstrukční obor.

Když jsem byl i já zlákán (zpočátku spíše proti své vůli) ke stavbě něčeho, na co by se dalo hrát, uvědomoval jsem si nejen atraktivnost konečného cíle, ale i naprostý nedostatek vhodné literatury. Okruh lidí, kteří s touto speciální technikou mají kontakt, je poměrně úzký a tím jsou omezeny i jen základní informace pro technickou veřejnost. Pak je pro každého, kdo se navíc orientuje v hudbě tak nesnadno jako já, poměrně obtížné vyznout se v principech, systémových a dílních problémech oboru.

Proto jsem uvitl nabídku redakce, abych zpracoval získané poznatky a zkušenosti do tohoto čísla *AR-B*, které se zabývá především klávesovými elektronickými nástroji. Obsah je členěn prakticky do tří částí. První se věnuje systematicky celé problematice. V ní jsem se snažil stručně zpracovat nejdůležitější fakta a postřehy v formě příručky tak, aby sloužily významnějším zájemcům jako úvod k hlubšímu vlastnímu studiu. Ve druhé části je pojednáno o koncepci amatérského nástroje a o problémech, spojených s výběrem vhodného systému. Tato část je v závěru zaměřena na návrh relativně jednoduchého nástroje, který je podle mého názoru (jako kompromis mezi kvalitou a náklady) vhodný

pro širší okruh zájemců o konstrukci elektronického hudebního nástroje. Třetí část se pak zabývá realizací nástroje, tedy popisem stavby, oživení a ladění.

## Fyzikální vlastnosti zvukových signálů

### Zvuk, tón

Jedním ze smyslů, jimiž člověk reaguje na podněty vnějšího okolí, je sluch, kterým vnímáme akustické podněty, označované souhrnně jako zvuky. Zdrojem jejich vzniku jsou kmity tuhých nebo pružných těles, mechanických soustav; prostřednictvím zvukových signálů je v běžných podmírkách vzduch. Rozruch, vznikající na rozhraní kmitající soustavy a okolního vzdachu je prostřednictvím přenášení k lidskému uchu. Víme, že jako zvuk vnímáme pouze signály v určité kmitočtové oblasti.

Harmonické (sinusové) mechanické kmity (akustické) leží přibližně v oblasti 16 Hz až 20 kHz, nazývané zvukovou (akustickou) oblastí. Kmitočtová oblast, ležící pod spodní hranicí tohoto rozsahu, se nazývá infrazvuková (subakustická), nad jeho horní hranicí pak ultrazvuková.

Jako zvuk tedy označujeme libovolný akustický projev v uvedené kmitočtové oblasti bez dalších specifikací, ať již pochází z jednoho zdroje, nebo je složen ze signálů několika zdrojů.

Naproti tomu tón je určitým druhem zvuku, jehož charakteristickým rysem je relativně stálý, periodický opakovací kmitočet  $f_p$ , z hudebního hlediska tedy výška tónu. K zařazení mezi tóny není důležité, jaký průběh mají kmity tohoto signálu. Pro posouzení kvalitativních a kvantitativních vlastností libovolného tónu je však třeba znát širší soubor parametrů. Jsou jimi především výška tónu, zabarvení tónu, dynamika a časový průběh těchto parametrů.

### Výška tónu

Výška tónu je nejdůležitějším kvalitativním parametrem tónu. Odlišnost jednotlivých tónů z tohoto hlediska spočívá v jejich různých opakovacích kmitočtech. Způsob definice tónů, užívaný v hudbě, nevychází

ovšem z fyzikálních jednotek [Hz], ale z novověho a hláskového označení, stanoveného podle zcela přesných pravidel. Tak např. často užívaný modulační kmitočet 440 Hz je pro hudebníka jednoznačně tónem a<sup>1</sup>. Kmitočtový poměr dvou tónů se nazývá interval. Intervaly tvoří základ jednotlivých způsobů ladění, stavby stupnic a akordických souvok.

Stupnice je vybraná řada tónů v rozsahu jedné oktávy. Otávou nazýváme buď poměr dvou tónů, který je roven 2:1, nebo obsah všech tónů, příslušných tomuto intervalu. Vnitřní oktávová struktura, tj. uspořádání jednotlivých tónových intervalů, závisí na způsobu ladění, který je ke stavbě oktávy použit. Toho si všimneme dál. Počet oktav nástroje vlastně určuje kmitočtový (tónový) rozsah, jaký může nástroj zpracovat. Protože poměrná vnitřní struktura všech oktav u jednoho nástroje je stejná, je shodné i hláskové (písmenné) označení tónů shodných pohyb v těchto oktávách. Proto má každá oktáva svůj název. Jako příklad můžeme použít klavír, jehož kmitočtový rozsah je vzhledem k běžným nástrojům zvláště široký. Názvy jednotlivých oktav (počínaje od nejnižší) jsou subkontra, kontra, velká, malá, jedno, dvou, tří, čtyř a pětičárková oktáva. Podle toho, ke které oktávě patří, se tón označuje; např. tón C se značí C<sub>2</sub>, C<sub>1</sub>, C, c, c', c'', c<sup>3</sup>, c<sup>4</sup>, c<sup>5</sup>. Rozsahy některých nástrojů a lidského hlasu jsou na obr. 1, upraveném podle [5]. Spektrum vyšších harmonických je znázorněno tenkými čarami.

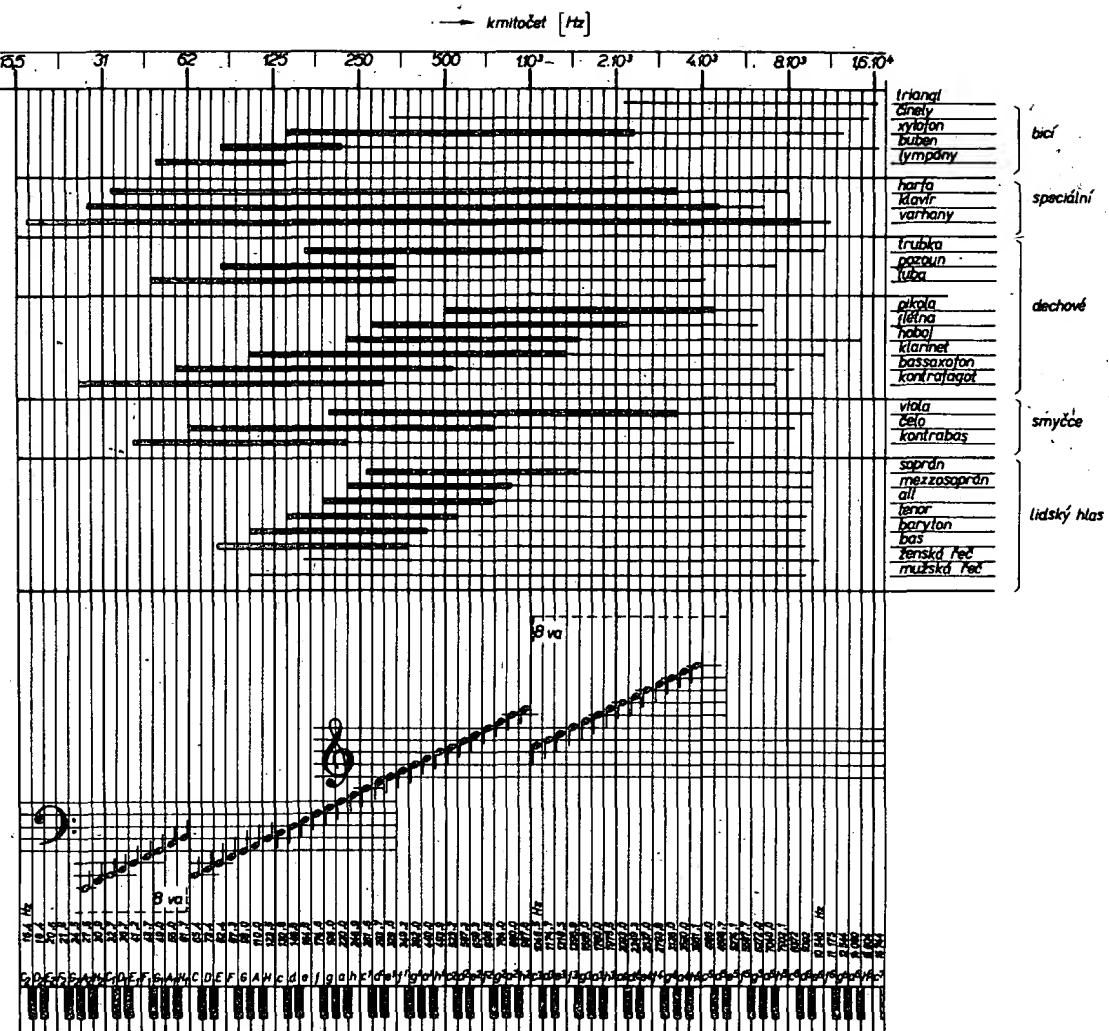
### Zvukové zabarvení

Dalším významným kvalitativním rysem tónu je jeho barva. Tak např. spolehlivě rozoznáváme tón určité výšky hraný na klarinetu od stejně vysokého tónu z trubky nebo jiných nástrojů. Odborník pozná i rozdíly mezi nástroji stejného typu, podobně jako většina z nás pozná podle hlasu své známé a přátele.

Důvodem rozdílů v barvě tónů je různé spektrální složení jednotlivých tónů, které je pro každý druh nástroje charakteristické. Rozvinutím časového intervalu jedné periody určitého tónu libovolného nástroje bývá zjistili, že průběh tohoto signálu má ve většině případů složitý tvar. Z harmonického (Fourierova) rozvoje je známo, že libovolný periodický signál je možno rozložit na řadu harmonických (sinusových) složek různé amplitudy, jejichž opakovací kmitočty jsou celistvými násobky (harmonickými) základního opakovacího kmitočtu (tónu). Právě počet a úroveň jednotlivých složek, zúčastněných na tvorbě komplexního průběhu, určuje charakteristické zabarvení příslušného tónu.

Dalším činitelem, který má vliv na barvu tónů jednotlivých nástrojů, jsou jejich rezonanční vlastnosti, které ovlivňují poměry harmonických složek v určitých kmitočtových oblastech. Těmito problémy se zabývá tzv. formantová teorie. Každý klasický nástroj má své rezonanční oblasti. Změna výšky hraného tónu, tj. kmitočtový posuv, ovlivňuje vzájemné poměry jednotlivých harmonických složek, pokud některé z nich právě spadají do formantové (rezonanční) oblasti nástroje. U elektronických nástrojů, které





Obr. 1. Kmitočkové rozsahy některých nástrojů

mají napodobit zvukové zabarvení určitého klasického nástroje, se často modelují formantové rezonance elektronickými obvody, tzv. formantovými filtry. Nejvýraznější formantové oblasti některých nástrojů jsou v tab. 1.

Kromě stabilních formantových oblastí se však u většiny nástrojů vyskytují také oblasti pohyblivé, a to především u nástrojů struných nebo jazyčkových. Ovlivňují však na rozdíl od stabilních oblastí spíše charakter základního tónu. Pohyblivé oblasti se obtížně vyšetřují a jejich vliv je mnohem méně výrazný.

Je třeba dodat, že určitý vliv na spektrální složení zvukového signálu má u většiny nástrojů také dynamika – při různých úrovních hlasitosti se totiž může měnit zvukové zabarvení. To dále souvisí i se subjektivním vnímáním sluchových orgánů. Problematikou spektrálního složení zvukových signálů se blíže budeme zabývat v další kapitole.

Tab. 1. Formantové oblasti vybraných nástrojů

Nástroj	Formantová oblast [Hz]
tuba	100 až 200
lesní roh	200 až 500
trombon	300 až 900
trubka	800 až 1700
saxofon	400 až 900
klarinet	300 až 600

## Dynamika

Dynamika je třetím důležitým parametrem pro hodnocení zvukového nebo tónového signálu, neboť jí lze vyjádřit rozsah hlasitosti signálu (jeho kvantitu). Se změnou dynamiky se mění také kvalita poslechu, což je působenou subjektivním vnímáním zvuku a nerovnoměrnou rozlišovací schopností lidského ucha.

Citlivost (rozlišovací schopnost) ucha je především kmitočtově závislá. I když se pochopitelně případ z případu poměrně výrazně liší, je možno z tzv. křivk výraznosti odvodit, že přibližně rovnoměrná je v rozsahu asi 500 až 5000 Hz. Na obě strany od této mezní kmitočtu se výrazně zmenšuje.

Rozlišovací schopnost ucha je rovněž nelineárně závislá na intenzitě zvuku. Subjektivní vjem změny intenzity určitého tónu je (zjednodušeně) úměrný pouze logaritmu poměru obou mezních intenzit. Rozsah dynamiky má tedy vliv nejen na kvantitativní, ale i kvalitativní parametry subjektivního vjemu, nehledě na požadavky z hlediska kompozice skladby.

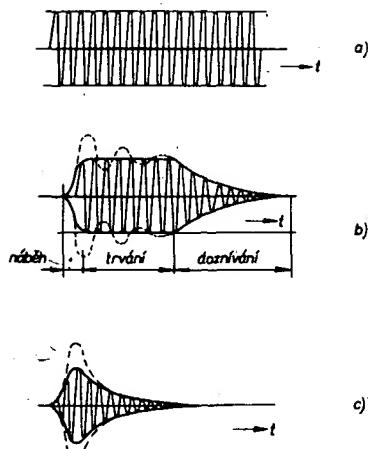
## Časový průběh

Mohlo by se zdát, že výška, spektrum a dynamika jsou tři parametry, jednoznačně definující zvuk určitého nástroje. To by však byl mylný dojem, u většiny nástrojů se spektrální složení a dynamika akustického projevu neustále mění, stejně jako (cyklicky)

i opakovací kmitočet. Řada klasických nástrojů také využívá nejrůznějších fines ke zvýšení brillance a líbivosti zvuku nástroje.

Popísemme-li tedy zvuk nástroje výškou, spektrální skladbou a úrovni hlasitosti, pak se tato definice vztahuje přesně pouze na dokonale periodický signál s jednotkovou amplitudou, tedy se stabilní modulační obálkou. Těmto požadavkům vyhovuje např. jednoduchý sinusový signál podle obr. 2a. Pro každý nástroj je však charakteristický originální průběh náběhu, trvání a dozvěny hraněho tónu. Např. dechovým nástrojům odpovídá obvykle pozvolně nasazení tónu (náběh), yětšinou s určitými překmity, trvání tónu s přibližně konstantní nebo zvolná se zmenšující amplitudou a konečně opět amplitudový pokles (dознівані). Jednotlivé intervaly časového průběhu jsou na obr. 2b. Poněkud odlišný charakter mají tóny nástrojů strunných nebo bicích. U nich bývá náběh tónu ostrý a tón pak samovolně dozívá. Průběh náběhu i dozívání však může být také ovlivňován (obr. 2c).

Uvedené příklady stačí, abychom si uvědomili vliv časového průběhu na akustický „projev“ nástroje. Pro jednoduchost jsme uvažovali harmonický signál. Většina nástrojů samozřejmě produkuje složité signály, u nichž se amplituda (modulační obálka) jednotlivých harmonických složek, zvýší nebo sníží při náběhu a dozívání, různě mění. Tím



Obr. 2. Časový průběh modulační obálky; a) kontinuální signál, b) interval dechových nástrojů, c) interval strunných nástrojů

dochází k časovým změnám spektrálního složení komplexního signálu, címž každý nástroj získává další charakteristický rys. V zahraniční literatuře se s oblibou poukazuje na skutečnost, že předvádí-li se hudebníkovi záznamy některých tónů z jemu dobré známého nástroje, upravený tak, aby trvale zněla pouze jejich „ustálená oblast“, nebo jsou-li uměle upraveny tónové náběhy, často nástroj obtížně poznává.

Průběh modulační obálky je tedy dalším důležitým činitelem, ovlivňujícím charakteristické vlastnosti jednotlivých skupin nástrojů. U elektronických nástrojů není zdaleka zanedbatelný a působí při jejich konstrukci poměrně značné obtíže.

Popsali jsme si pro další potřebu a orientaci některé nejzávažnější činitely, charakterizující hudební signály. S řadou dalších se však ještě postupně seznámíme.

### Základy hudební teorie

Základními pilíři každé melodie a hudební teorie i praxe jsou jednotlivé tóny. Ty z hlediska konstrukce nástroje představují především kmitočtové normály, které musí být u nástroje přesně nastaveny. Kmitočty, odpovídající jednotlivým tónům, je možno stanovit exaktně, známe-li vnitřní systém příslušného ladění nástroje. Protože se v této oblasti vyskytuje některé zakoreněné nesprávné představy, věnujeme se systémům ladění hudebních nástrojů poněkud podrobnejší.

Kvalitativní vztahy dvou nebo více tónů je možno v zásadě stanovit dvěma rozdílnými způsoby: buď lze stanovit absolutní výšky (kmitočty) zúčastněných tónů, nebo lze využít

Tab. 2. Kmitočtové poměry běžných intervalů

Název intervalu	Poměr čistého ladění	Poměr temperovaného ladění
malá tercie	$6:5 = 1,20$	$4\sqrt{2}:1 = 1,19$
velká tercie	$5:4 = 1,25$	$3\sqrt{2}:1 = 1,26$
kvarta	$4:3 = 1,33$	$12\sqrt[3]{5}:1 = 1,33$
kvinta	$3:2 = 1,50$	$12\sqrt[3]{2}:1 = 1,50$
malá sexta	$8:5 = 1,60$	$3\sqrt[3]{4}:1 = 1,59$
velká sexta	$5:3 = 1,67$	$4\sqrt[3]{3}:1 = 1,68$
oktaava	$2:1 = 2,00$	$2:1 = 2,00$

Tab. 3. Srovnávací tabulka pythagorického a čistého ladění

Tón	Intervaly		Kmitočet f[Hz]	Intervaly		Kmitočet f[Hz]
	vůči C	jednotlivé		vůči C	jednotlivé	
c <sup>1</sup>	1	9:8	261,63	1	9:8	261,63
d <sup>1</sup>	9:8	9:8	294,33	9:8	10:9	294,33
e <sup>1</sup>	81:64	256:243	321,09	5:4	16:15	327,04
f <sup>1</sup>	4:3	9:8	348,83	4:3	9:8	348,83
g <sup>1</sup>	3:2	9:8	392,44	3:2	10:9	392,44
a <sup>1</sup>	27:16	9:8	441,50	5:3	9:8	436,03
h <sup>1</sup>	243:128	256:243	496,68	15:8	16:15	490,56
c <sup>2</sup>	2		523,26	2		523,26

pythagorické ladění

soby, dostáváme částečně odlišné výsledky. Ukažme si několik příkladů: dělíme-li pythagorickou tercií velkou čistou tercií (složenou z velkého a malého tónového intervalu), tj.

$$\frac{81}{64} : \frac{5}{4} = \frac{81}{80}$$

dostáváme malý kmitočtový rozdíl, poměr je různý od jedné. Intervaly tercie jsou u obou ladění odlišné, podobně se liší např. sexty; nebo vyjdeme-li od C<sub>1</sub>, získáme po sedmi oktávových intervalech tón c<sup>5</sup>. Stejný tón bychom měli dostat také kaskádou dvanácti kvintových intervalů (v pythagorickém i čistém ladění jím odpovídá poměr 3:2, oktávový poměr je 2:1). Srovnání obou způsobů  $[(3/2)^{12} : 2^7 = 1,0137]$  zjišťujeme znovu odchylku od jednotkového poměru, absolutní chyba narůstá s počtem oktáv. U nástrojů s pevným laděním by tyto odchylky a nerovnoměrnost intervalové stavby umožňovaly ladit systém pouze v jediné stupnici, což nevyhovuje. Klávesové nástroje si tak přímo využívají další druh ladění, temperované.

Temperované ladění je charakteristické svou rovnomořností. Rozsah oktávy je rozdělen na dvanáct identických poměrných intervalů, tzv. temperovaných půltónů. Jejich poměrná výška je určena výrazem  $12\sqrt[12]{2}$ . Tónový interval je určen součinem dvou půltónových a tedy roven  $6\sqrt[12]{2}$ . Stejně určíme jakýkoli jiný interval: Základy temperovaného ladění položil již v r. 1454 matematik Michael Stifel a v průběhu let byl systém doveden do dnešní podoby.

Vynikající předností temperovaného ladění je možnost sestavit univerzální chromatickou stupnici, využívající všech dvanácti intervalů oktávy tohoto ladění. Vhodným výběrem jednotlivých tónů stupnice je pak možno sestavovat libovolně požadované stupnice nebo akordy v libovolných tóninách, protože jednotlivé intervaly neodpovídají sice zcela přesně ideálnímu hudebnímu čitění, ale vyznačují se nepatrnými odchylkami (ke srovnání lze použít tab. 2). Tyto disonantní odchylky jsou však velmi nepatrné a prakticky nepotřebněné, jsou jedinou daní, kterou platíme za náhradu velkých a malých intervalů čistého ladění průměrným, jednotkovým mocninovým intervalem. Výhoda snadného vytváření libovolných intervalů prakticky stejněho stupně čistoty ve všech

### Druhy ladění

Podle historické posloupnosti rozeznáváme v dějinách hudby tři nejdůležitější etapy vývoje ladění hudebních nástrojů.

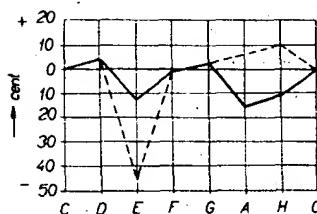
Pythagorické ladění je vývojově nejstarší, bylo používáno již v I. století před naším letopočtem. Tomuto ladění odpovídá základní diatonická stupnice, výchozím tónem je c. Interval celého tónu je definován poměrem 9:8, půltónový interval je 256:243. Tercie v pythagorickém ladění je určena poměrem  $9^2 : 8^2 = 81 : 64$ . Jednotlivé intervaly jsou zřejmě ze srovnávací tabulky ladění (tab. 3).

Cisté (přirozené) ladění pochází ze středověku. V této době se již začaly projevovat snahy o jednotný ladící systém, o přesnou definici základního tónu atd. U čistého ladění je především nahrazen kmitočtový interval pythagorické tercie (81:64) poměrem 5:4, nazývanou čistou velkou tercií. Tomu odpovídá zavedení nerovnoměrných tónových intervalů. Intervaly celých tónů se dělí na dva typy, velké s kmitočtovým poměrem 9:8 a malé s poměrem 10:9. Půltónový krok je definován poměrem 16:15. Cisté ladění nejlépe odpovídá přirozenému hudebnímu čitění a je vhodné pro nástroje, u nichž může hudebník během hry plynule ovládat výšku hraného tónu nebo tónů. Jednotlivé intervaly jsou v tab. 3.

Obe dosud uvažovaná ladění mají pro aplikaci v klávesových nástrojích jeden zásadní nedostatek: systém znějících intervalů není jednotný. Pokusíme-li se např. vypočítat kombinaci několika intervalů různými způ-

Tab. 4. Vzájemné poměry jednotlivých intervalů oktávy temperovaného ladění

Tón	C	Cis	D	Dis	E	F	Fis	G	Gis	A	B	H	C
Interval k C	1	$12\sqrt[12]{2}$	$12\sqrt[12]{2^2}$	$12\sqrt[12]{2^3}$	$12\sqrt[12]{2^4}$	$12\sqrt[12]{2^5}$	$12\sqrt[12]{2^6}$	$12\sqrt[12]{2^7}$	$12\sqrt[12]{2^8}$	$12\sqrt[12]{2^9}$	$12\sqrt[12]{2^{10}}$	$12\sqrt[12]{2^{11}}$	2



Obr. 3. Odchylky základních tónů pythagorického a čistého ladění od temperovaného v oktávovém intervalu (čisté ladění – plná čára, pythagorické – přerušovaná čára)

tóninách tuto malou „kosmetickou“ vadu zcela zastiňuje. Vzájemné poměry jednotlivých intervalů oktávy temperovaného ladění jsou v tab. 4. V temperovaném ladění, které dálé budeme výlučně používat, je tedy poměr opakovacích kmitočtů dvou sousedních půltónů konstantní a je definován jako  $f_p = f_0 \sqrt[12]{2} = f_0 \cdot 1,059 463 094$ . Jako základní (normálový) tón temperovaného ladění se užívá tón a, který je definován jako signál opakovacího kmitočtu 440,00 Hz.

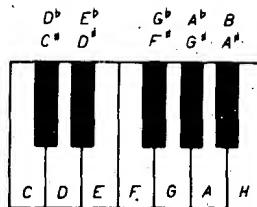
Vzájemné odchylky tónů diatonické stupnice, která se používá u všech tří uvažovaných způsobů ladění, jsou v rozsahu jedné oktávy znázorněny na obr. 3.

#### Oktáva, ustálené uspořádání klaviatury

Již dříve jsme si naznačili, že oktávou rozumíme buď oktávový poměr dvou tónů, nebo si pod tímto pojmem představujeme soubor tónů v uvedeném intervalu. Každá oktáva v temperovaném ladění obsahuje dvanáct tónů (přesněji půltónů), mezi nimiž je vždy stabilní půltónový interval. Historickým vývojem se došlo k ustálenému uspořádání ovládacího manuálu (klaviatury) klávesových nástrojů, které je možno vzhledem k tradici považovat za konečné (obr. 4, jedna oktáva na manuálu se opakuje tolíkrát, kolik má nástroj oktav).

Bílé klávesy tvoří základní diatonickou stupnicu, která začíná tónem C. Jednotlivé tóny této stupnice jsou C-D-E-F-G-A-H-C. Z hudebního nebo fyzikálního hlediska je pro nás zajímavé především to, že mezi jednotlivými tóny této stupnice, která je tvořena bílými klávesami, je uvnitř oktávy vzájemný kmitočtový poměr  $f_H = f_0 \sqrt[12]{2}$ , tzv. tónový krok, protože je mezi nimi vřazena vždy jedna klávesa černá, jeden půltón. Výjimku tvoří interval E-F, kde dvě bílé klávesy sousedí přímo, což také odpovídá půltónovému intervalu této tónu: stejně je navázán tón (klávesa) H na C vyšší oktávy, nebo tón C na H nižší oktávy.

Označme-li si postupně jednotlivé tóny základní diatonické řady latinskými číslicemi, dostáváme známé hudební vyjádření pro vytvoření intervalů – východiskem zde může být kterýkoli tón. Tak např. pro uspořádání oktávy podle obr. 4, kde je výchozím tónem C, platí tab. 5. (Pro orientaci je tabulka rozšířena o část vyšší oktávy, tyto intervaly se užívají v harmonii nebo při složitější akordové stavbě.) S kmitočtovými poměry jednotlivých intervalů jsme se již seznámili. Uvedené intervaly základní diatonické řady se nazývá-



Obr. 4. Uspořádání oktávy klávesového manuálu

jí základními – pojmenování intervalů je vždy vztázeno k srovnávacímu, základnímu tónu. Tak např. E je tercii k C (C-D-E). G kvintou k C, ale také tercii k E apod. Tato definice není zcela přesná; např. interval tercie v diatonické řadě určuje vlastní odstup dvou mezních tónů, dvou tónových intervalů. Interval v diatonické řadě může však být tvořen jak tónovým, tak půltónovým krokem. Pro přesnější určení je tedy k názvu intervalu třeba připojit další označení, např. čistý, velký, malý atd., které určí skutečný stupeň intervalu. Tak např. dříve uvedený interval C-E je velká tercie (dva celé tónové intervaly), E-G malá tercie (1 1/2 tónového intervalu), C-G kvinta (čistý interval 3 1/2 tónu). Cis je malá sekunda k C (půltónový interval), D velká sekunda k C (jeden tónový interval) atd. Pro úpravu intervalů diatonické stupnice na tyto a řadu dalších intervalů (zmenšené, zvětšené ...) je již často třeba používat stupnice chromatickou, která vznikne doplnění diatonické řady chybějícími půltónovými intervaly temperovaného ladění. Tyto intervaly představují na klaviatuře černé klávesy. S jejich pomocí se také přechází do jiných hudebních poloh, ale vždy tak, že základní intervalové schéma a tím i stupeň čistoty transponovaných intervalů zůstávají (až na malé disonantní odchylky temperovaného ladění) stále stejné:

#### Stupnice, akordy

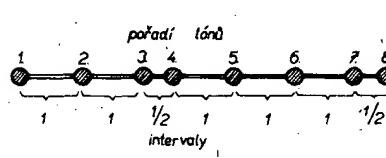
I když stupnice (uspořádání tónů) samy o sobě nemají pro hudební praxi větší význam, poslouží nám jistě pro lepší počáteční orientaci v systému klaviatury. Nejznámější z nich jsou dur a moll, rozhodující pro jejich rozlišení je kvalita třetího stupně. Durových stupnic např. existuje prakticky dvanáct, v podstatě se však jedná o transpozice základního durového schématu na obr. 5. Charakteristické pro durovou stupnici jsou půltónové intervaly mezi 3. až 4. a 7. až 8. tónem. S užitím intervalového počtu můžeme podle základního schématu lehce stanovit kteroukoli durovou stupnici. Příklad viz tab. 6. Naopak pro mollovou stupnicí je typická malá tercie na třetím stupni.

Významnější než u stupnic jsou intervaly při tvorbě akordů, tedy souzvuku několika tónů; každý akord má svoji přesně definovanou intervalovou sestavu. Např. základní durový akord, hrány v kvintovém rozpětí, má sestavu prima – velká tercie – malá tercie (intervaly se určují mezi jednotlivými vzesupnými tóny). Intervalová skladba umožňuje znova určit sestavu tohoto akordu v libovolné poloze, např.

$$\text{C dur} = \text{C-E-G}, \\ \text{D dur} = \text{D-Fis-A}.$$

Obr. 5.

Intervaly	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
Tón	C	D	E	F	G	A	H	C	D	E
Název	prima	sekunda	tercie	kvinta	kvinta	seksta	septima	oktaava	nona	decima
	oktaava				část další oktaavy					



Obr. 5. Základní durové schéma

Tab. 6.

Cdur	C	D	E	F	G	A	H	C
Ddur	D	E	Fis	G	A	H	Cis	D
Edur	E	Fis	Gis	A	H	Cis	Dis	E

Nebo sestava mollového akordu je prima – malá tercie – velká tercie. Znovu můžeme určit příklad sestavy

$$\text{C moll} = \text{C-Es-G}, \\ \text{C moll} = \text{D mi} = \text{D-F-A}.$$

Částečně si intervalových počtů a akordové sestavy ještě povídáme při rozboru konceptu amatérského elektronického nástroje. Toto malé odbočení do hudební teorie bylo určeno pro ty čtenáře, kteří v hudební oblasti nemají žádnou průpravu. Kromě snahy o zachování souvislosti jednotlivých částí předchozího textu jsem zde chtěl především ukázat, že v hudebně platí stejně jako v technice přesné zákonitosti, které je možno studovat i samostatně, že pro rekreaci provozování hudby je možno zajímavým způsobem kombinovat hrani zpaměti, učení not, intervalové stavby a harmonie, což je jistě mnohem zábavnější, než úmorné dření jednotlivých skladeb. Sám jsem si tuto cestu na sobě vyzkoušel (nebo lépe zkouším) a mohu říci, že je to velmi příjemný způsob odreagování a vyplnění volného času. Stejným laikum, jako jsem já, bych doporučoval knížku Milana Solce Tajemství akordových značek: stručný a systematický výklad v mnohem připomíná technickou literaturu, na jakou jsme zvyklí.

#### Stabilita ladění

Víme již, že mezi jednotlivými druhými opakovacími kmitočty, příslušné tónům shodnému hudebnímu označení, poněkud liší a víme také proč. Průběh těchto odchylek jsme si znázornili na obr. 3, kde užita srovnávací jednotka je označena jako cent. Nabízí se jistě několik otázek: co to vůbec cent je? Jaká odchylka v ladění jednotlivých tónů je vlastně přípustná?

Při konstrukci elektronických nástrojů se jedná v tomto případě o základní problém, protože nedostatečně stabilní generátory prakticky znehodnocují i jinak kvalitní nástroje a působí uživateli velké potíže.

Casto slycháme, že člověk je schopen rozeznat kmitočtovou odchylku od správného ladění v rozsahu určitého počtu Hz. To může být v některém případě pravda, ale taková definice nevyhází ze správného přístupu k problému. Hudební nástroje s rozsahem několika oktav produkuji široký obor tónových signálů, proto např. odchylka 1 Hz u tónu C<sub>2</sub> v subkontraoktavé bude jistě zcela nepřípustná, zatímco u tónu C<sub>5</sub> v pětioktavé je již v žádném případě nemůžete postřehnout největší odborník. Vidíme, že kmitočtová odchylka musí být nutně vztahována ke znoumanému tónu (kmitočtu).

Existuje však jiný, univerzální způsob pro hodnocení míry tónové odchylky. Víme, že v temperovaném ladění je poměrný půltónový krok konstantní a roven  $\sqrt[12]{2} : 1$ , tj. 1,059 463 094. Tato konstanta umožňuje odvodit poměrnou jednotku, kterou lze stanovit tónovou odchylku nezávisle na opakovacím kmitočtu. Jednotka, nazývaná v německé literatuře cent, je definována jako 1/100 půltónového poměrného intervalu. Charakter takto definované odchylky je neli-

neární, protože vychází z rovnoměrného dělení jednotlivých úseků funkce mocninového charakteru: Pro jeden cent si můžeme snadno odvodit součinitel  $\alpha$ , významově odpovídající odchylce jednoho centu, z rovnice

$$\alpha = \frac{1}{100} (12\sqrt{2} - 1) = 5,946 \cdot 10^{-4}$$

Kmitočet lišící se od určitého tónu s opakovacím kmitočtem  $f_A$  o  $X$  centů si pak můžeme stanovit jako

$$f_B = f_A (1 + 5,946 \cdot 10^{-4} X),$$

zpětne můžeme stanovit odchylku v centech mezi zkoumaným a normálovým tónem

$$X = 1682 \left( \frac{f_B}{f_A} - 1 \right) \quad [\text{centy; Hz}]$$

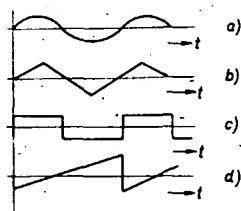
Odchylce 100 centů odpovídá sousední půltón – oblast praktického využití se však omezuje na odchyly řádu jednotek až desítek centů.

Dlouhodobými testy specialistů, hudebníků a laidičů hudebních nástrojů bylo ověřeno, že školený specialista bezpečně rozlišuje odchyly ladění v oblasti  $\pm 5$  až 10 centů. Tato rozlišovací schopnost je v odborných kruzích všeobecně považována za přijatelné kritérium stability hudebního nástroje. Můžeme si snadno odvodit, že stabilita  $\pm 5$  centů odpovídá poměrná kmitočtová odchylka  $f_A/f_B = 1,006$ , tj. od generátoru elektronického nástroje musíme požadovat, aby jejich stabilita byla za všechny vlivy přicházejícími okolnosti lepší, než 0,6 %. Při uvážení vlivu teplotních a klimatických činitelů, požadavku reprodukovatelnosti a dlouhodobého charakteru požadované stability si snadno uvědomíme, že dosáhnout tohoto cíle jednoduchými prostředky je poměrně obtížné..

## Elektronická syntéza barvy zvuku

### Rozbor spektra základních periodických signálů

Akustické vlastnosti každého nástroje jsou závislé především na spektrálním složení jím produkovaného tónu, tvořeného složitými signály periodických nebo cyklických průběhů; bezprostřední generování těchto signálů je vzhledem k technickým problémům prakticky nemožné. Pro napodobování zvuku klasických nástrojů, stejně jako pro vytváření nových, nekonvenčních, se v elektronických nástrojích využívá nejčastěji syntézy základních periodických průběhů. Mezi ně patří (podle spektrálních vlastností a jednoduchosti tvorby) především sinusový, trojúhelníkovitý, pravopůhlý a pilovitý průběh. Tyto průběhy jsou na obr. 6. Každý z nich má specifický akustický charakter, vzájemně se



Obr. 6. Základní periodické signály; a) sinusový průběh (neobsahuje žádné harmonické složky), b) trojúhelníkovitý průběh (obsahuje liché harmonické), c) pravopůhlý průběh (obsahuje harmonických závisí na střídě signálů), d) pilovitý průběh (obsahuje liché a sudé harmonické)

liší různým obsahem různých harmonických složek.

Signál sinusového průběhu můžeme z tohoto hlediska považovat za výchozí. Je nej-jednodušší, neobsahuje žádné vyšší harmonické složky. Symbolicky jej můžeme zapsat jako  $y = f(\sin x)$ . Veškerá energie je soustředěna na základní (první) harmonické.

Signál trojúhelníkovitého průběhu je jiný, skládá se z algebraické kompozice většího počtu sinusových průběhů různého energetického obsahu, jak vyplývá ze symbolického zápisu Fourierova rozvoje pro tento tvar časové funkce

$$y = f \left[ \frac{4}{\pi} \left( \sin x + \frac{\sin 3x}{3} + \frac{\sin 5x}{5} + \dots \right) \right]$$

Vidíme, že hlavní energetický podíl je soustředěn znova na základním kmitočtu, ostatní složky jsou obsaženy výlučně v lichých harmonických. S rostoucím řádem harmonické klesá obsah těchto složek, např. třetí harmonická obsahuje 11 %; pátá harmonická 4 %, sedmá harmonická 2 % a devátá pouze 1 % (ve srovnání se základní harmonickou složkou). Smíšme-li tyto jednotlivé sinusové signály v uvedeném amplitudovém, kmitočtovém a fázovém poměru, získáme v podstatě původní signál trojúhelníkovitého průběhu – tomuto postupu říkáme harmonická syntéza.

Signál pravoúhlého průběhu je jedním ze signálů, které mohou obsahovat jak sudé, tak i liché harmonické. Důležitý je pro spektrální obsah tohoto signálu je jeho střída. Zvláštním případem, v elektronických nástrojích užívaným nejčastěji, je signál se střídou 1 : 1. Tento signál je možno zapsat jako

$$y = f \left[ \frac{4}{\pi} \left( \sin x + \frac{\sin 3x}{3} + \frac{\sin 5x}{5} + \dots \right) \right],$$

což znamená, že znova obsahuje pouze liché harmonické.

Konečně signál pilovitého průběhu obsahuje jak liché, tak sudé harmonické složky

$$y = f \left( \sin x - \frac{\sin 2x}{2} + \frac{\sin 3x}{3} - \dots \right).$$

Zvláštním druhem signálu se širokým kmitočtovým spektrem nejrůznějších amplitudových a fázových vztahů, který se používá v některých zařízeních, je bílý šum. Také s jeho využitím se později seznámíme.

### Způsoby využití základních signálů

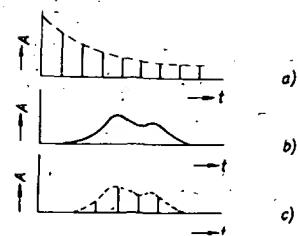
Podle toho, jaké signály a jakým způsobem se podílejí na tvorbě výsledného komplexního signálu, rozlišujeme systémy s

- harmonickou syntézou,
- selektivním výběrem,
- registrovou syntézou.

V praxi se ovšem základní systémy nejrůzněji upravují nebo kombinují.

Podstatu harmonické syntézy jsme si osvětlili na harmonické syntéze signálu trojúhelníkovitého průběhu. Harmonická syntéza předpokládá, že je k dispozici potřebné množství vhodných harmonických složek, aby jejich kompozice ve vhodném poměru mohla s dostatečnou přesností napodobit požadovaný průběh. V této souvislosti je zajímavé, že nemusí být dodrženy fázové vztahy harmonických kmitočtů, jak vycházejí z rozvoje. Lidské ucho je totiž na fázové poměry jednotlivých složek výrazně necitlivé. Harmonické syntézy se často využívají u elektromechanických systémů s rotačními disky (s fotoelektrickým nebo elektromagnetickým snímáním), u nichž bylo možno snadno získávat jednotlivé harmonické průběhy v libovolném poměru (určeném předlohou), srovnávat je s výsledným signálem a srovnávat s výsledným signálem.

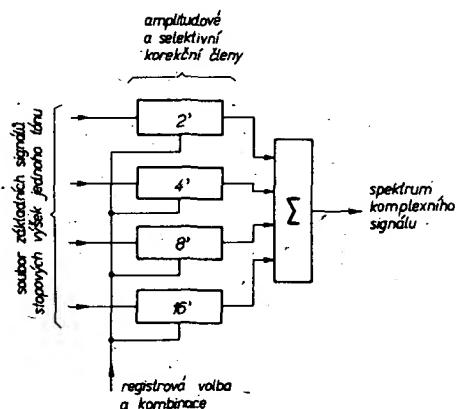
Metoda selektivního výběru využívá jako základní signálů signály s bohatým spektrum, s pokud možno rovnoměrně rozloženým energetickým obsahem jednotlivých složek. Z dříve uvedených základních signálů



Obr. 7. Princip selektivního výběru; a) spektrální složení základního signálu, b) přenosová charakteristika filtru, c) korigované spektrum výstupního signálu

je nejvhodnější signál s průběhem pilovitým. Spektrální obsah takového signálu je na obr. 7a. Filtr s vhodnou amplitudovou charakteristikou (obr. 7b) je možno vnitřit průchodu signálu odpovídající spektrální složení (obr. 7c) včetně respektování formantových oblastí napodovaných nástrojů. Potom ovšem musí mít filtry složitější průběh přenosové charakteristiky.

Nedostatkem harmonické syntézy je především její složitost a tím i ekonomická nevýhodnost. Nedostatkem selektivního výběru je omezený rozsah zvukových záření, mají-li vstupní signály některé z uvedených periodických průběhů. S tím např. souvisí i obtížné vyrovnávání hlasitosti a barevného zvuku v rozsahu celého nástroje. Registrová syntéza v kombinaci se selektivním výběrem jednotlivých vstupních signálů je kombinací, využívající předností obou předchozích metod. Princip je znázorněn na obr. 8. Jako



Obr. 8. Princip registrové syntézy

vstupní signály se nejčastěji používají signály pravoúhlého průběhu se střídou 1 : 1 nebo jejich odvozeniny, tvořené průchodem signálů kmitočtově závislými nebo nelineárními přenosovými články. Tak je ovlivňován spektrální obsah jednotlivých vstupních signálů. Pro každý tón musí být u registrové syntézy k dispozici těchto signálů několik. Základní je tvořen průběhem s opakovacím kmitočtem požadovaného tónu. Další složky jsou tvořeny vhodně upravenými průběhy, jejichž opakovací kmitočty jsou vždy o oktavu vyšší. Tímto způsobem jsou do signálu zaváděny složky, obsahující potřebné sudé harmonické. Jejich působením získává výsledný signál bohatý spektrální obsah. Analogii harmonické syntézy je možnost ovlivňovat energetické poměry jednotlivých vstupních signálů ve výsledném, komplexním signálu. Popsaný princip registrové syntézy je pouze teoretický, praktická řešení využívají k ovlivňování zvukového záření jak oktaových násobků, tak zlomků základního kmitočtu. Důvodem je snaha omezit počet potřebných vstupních registrových signálů, omezit výrobní náklady a rozšířit počet výrazných zvukových záření. U polyfonických nástrojů bývají

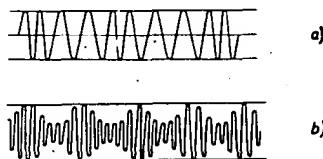
také často užívaný vstupní registróvý signál, jejichž vztah k základnímu signálu není periodický (oktávový), ale cyklický. Jako doplňkové signály se užívají některé z těch, které tvoří se základním signálem souzvuk, např. kvinta nebo tercie. Tyto složky dávají výslednému signálu zvláštní „atmosféru“, zvukovou malebnost.

Dosud jsme v této kapitole uvažovali, s výjimkou užití tercie nebo kvinty, aplikaci přesně periodických signálů. Když jsme pojednávali o akustických vlastnostech klasických nástrojů, všimli jsme si, že výrazný podíl na jejich zvukové živosti a malebnosti mají neustálé dynamické změny výšky tónu, zábarvení, dynamiky a časového průběhu těchto parametrů. Podobným způsobem jsou vytvářeny různé efekty také v elektronických nástrojích, s nimiž se postupně seznámíme. V následujícím odstavci si všimněme pouze dvou typů základních efektů, využívajících cyklických změn některého z parametrů komplexního akustického signálu.

### Vibrato, tremolo

K realizaci obou efektů je třeba použít další periodický signál (tentokrát však bez jakéhokoli poměru k jednotlivým tónům), kterým ovlivňujeme některé parametry akustického signálu. Jedná se tedy vždy o signál modulačního charakteru. Podle toho, jaký druh modulace je použit, rozlišujeme oba uvedené efekty.

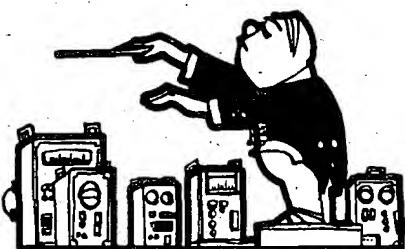
Principem *vibrata* je kmitočtová modulace. Jako modulační signál se používá nejčastěji symetrický sinusový signál s infrazvukovým opakovacím kmitočtem asi 5 až 9 Hz. Kvalita efektu bývá ovlivňována jak úpravou modulačního kmitočtu, tak úrovní poměrného kmitočtového zdvihu. U běžných aplikací musí být kmitočtový zdvih symetrický a obvykle menší než půltónový interval, aby nedocházelo k falešně znějícímu rozložování generátorů. Důležité je také stejně poměrné rozložování všech základních generátorů ve všech polohách. Příklad kmitočtové modulace je na obr. 9a.



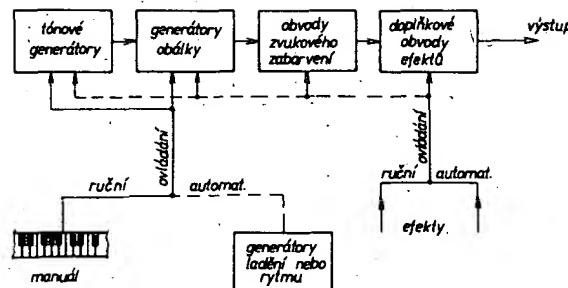
Obr. 9. Znázornění principu vibrata (a) a tremola (b)

Pojmem *tremolo* označujeme efekt, který je vytvářen amplitudovou modulací komplexního signálu. Opět se používá infrazvukový modulační signál, tentokrát v oblasti asi 7 až 12 Hz. Charakter efektu je možno ovlivňovat úpravou modulačního kmitočtu a hloubky modulace. Tremolo nesmíme zaměňovat s efektem, který využívá postranních složek amplitudově modulovaného signálu (aplikace kruhových modulátorů). Princip amplitudové modulace je na obr. 9b.

Oba efekty bývají často kombinovány. Existuje řada dalších velmi podobných efek-



Obr. 10. Symbolické blokové schéma elektronického hudebního nástroje



tú, ať již z hlediska technického nebo hudebního, např. fázové vibrace, dílčí (stopové) tremolo atd. Jedná se většinou o speciální aplikace, které je třeba vždy přesně specifikovat. Pod pojmem tremolo a vibrato budeme proto vždy rozumět pouze dva právě popsáne efekty.

### Elektronické hudební nástroje

#### Ohlédnutí do historie

Ne každému objevu nebo vynálezu bývá souzena tak dlouhá a složitá cesta k aplikaci a společenskému uznání, jako tomu bylo v případě praktického využití elektrického vytváření tónů. Většina pramenů se shoduje v tom, že základní principy byly položeny již v r. 1838 Švýcarem Dellezenem, který tehdy publikoval generování tónu s použitím rotujícího tvarovaného ocelového kola a elektromagnetu. Snad nás, kteří jsme v době vědeckotechnické revoluce podvědomě připraveni nedat se zaskočit snad něčím, přinutí alespoň smeknout klobouk, uvědomíme-li si, že při spisování svého dila si pravděpodobně musel svítit voskovicí, protože to bylo 40 let před tím, než Edison rozsvítil první žárovku. V té době tedy elektronika neexistovala v žádné formě! Na uvedeném principu postavil v r. 1895 Angličan Cashill nástroj o váze mnoha tun, který byl skutečně užíván pro hudební produkce – ovšem prostřednictvím telefonní sítě, protože vhodnější elektroakustické měniče než sluchátko tehdy ještě neexistovaly.

První výrazná vlna, která naznačila možnosti čistě elektronických nástrojů, byla v dvacátých letech našeho století. V řadě zemí (SSSR, Anglie, Francie, Německo, USA...) byly vyvíjeny jednohlasé nástroje, zpočátku ještě bez kláves – tóny bývaly často využívány „magickým“ pohybem ruky kolem záhadného nástroje. Postupně byly nástroje opatřovány klávesami, byly systematicky studovány metody generování tónů, vytváření zvukového zbarvení a další problematika. Po přestavce, vynucené druhou světovou válkou, byl další vývoj mohutně povzbuzen objevy v polovodičové sféře a zvláště průmyslovou realizací tranzistoru. Odtud se také datuje období komerčionalizace elektronických nástrojů. Konečně v našem desetiletí se s objevy nových systémů a aplikací, důsledně využívajících možnosti nových technologií, dostavují úspěchy největší. Elektronická hudba dochází uznání v uměleckých kruzích a mašově se šíří a postupně proniká do oblasti populární hudby a konečně i do domácností. Sám se domnívám, že tak jako dříve skoro v žádné domácnosti nechyběly housle nebo klarinet, tak v blízké budoucnosti nebude chybět nějaké to elektronické přípátko.

#### Druhy elektronických nástrojů

Abychom se mohli orientovat v jednotlivých problémech, musíme nějak rozlišit užívané systémy elektronického vytváření

a zpracování hudebních signálů. To je však poměrně obtížné. Na obr. 10 jsem se pokusil znázornit všeobecné schéma systému, generujícího hudební signál. Toto schéma (s určitými výhradami) zachycuje charakteristické obvody, vyskytující se v různých formách u všech elektronických nástrojů. Přitom zásadní změna kteréhokoli z nich může vyvolat zcela jiné systémové řešení a dokonce i jinou aplikaci celého nástroje! Jako cestu k diferenciaci nástrojů zvolíme cestu postupných obměn jednotlivých funkčních bloků.

#### 1. Tónové generátory

Jsou to v zásadě elektronické obvody, definující výšku jednotlivých požadovaných tónů. Podle způsobu využití lze generátory dělit na typy:

- se spojitu činností (tj. stále kmitající generátory),
- nespojitu činností (každý generátor je uváděn do činnosti ovládacím zařízením, např. klávesou).

Realizace generátorů je důvodem dalšího dělení nástrojů na systémy s generátory typu:

- analogového,
- digitálního,
- konverzního.

Zvláštností co do řešení a použití jsou generátory šumové.

#### 2. Ovládaci zařízení

Ovládaci zařízení slouží obecně jako periiferie, pomocí níž je nástroj ovládán. Nejpoužívanější je klávesový manuál. Podle jeho realizace se dále rozlišují klávesové nástroje:

- konstantní dynamikou, kterých je drtivá většina,
- se regulovatelnou dynamikou. V těchto případech nebývá klávesa vybavena pouze jednoduchým spínačem, ale prvkem reagujícím na polohu, sílu nebo zrychlení tisku klávesy.

Z vnitřního vzájemného vztahu generátorů a manuálu nástroje vyplývá nejrozšířenější systémové dělení, určované počtem kláves, které mohou současně znít:

- nástroje jednohlasé,
- nástroje vícehlasé,
- nástroje polyfonní.

Ovládaci zařízení ovšem nemusí být pouze klávesový manuál. Např. jeho nahrazením poloautomatickým nebo automatickým zařízením, umožňujícím postupný výběr jednoho nebo skupiny tónů, se vyznačují nástroje, jako jsou:

- generátory rytmů,
- syntetizéry.

Ruční i automatické ovládání se mohou kombinovat.

#### 3. Generátory obálky

Podle realizace časového průběhu generovaného signálu dělíme nástroje na nástroje:

- konstantním průběhem obálky,

b) s nastavitelným tvarom obálky,  
c) s variabilními efekty.

#### 4. Obvody zvukového zabarvení

S těmito systémy jsme se již seznámili. Můžeme rozlišovat nástroje s  
a) harmonickou syntézou,  
b) selektivním výběrem,  
c) rejstříkovou syntézou,  
d) speciální – patří mezi ně např. aplikace napěťově řízených obvodů (zesílovačů, filtrů, atd.).

V praxi bývají obvykle některé systémy kombinovány.

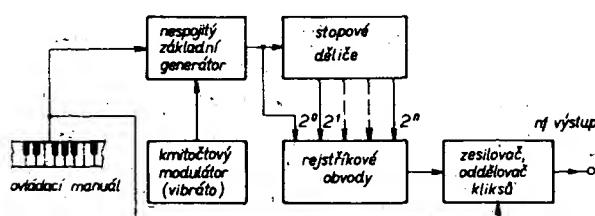
Jíž z tohoto jistě nevyčerpávajícího srovnání je zřejmé, že existuje mnoho nejrůznějších čítačů, které mohou ovlivňovat naš přístup k hodnocení nebo konstrukci nástrojů. A to jsme si zároveň nevšímali žádných efektů nebo doplňků, které jsou rovněž velmi náročné z hlediska řešení – viz např. oživení, dozvuk, chorus nebo efekt Leslie atd.

Abychom se mohli dotknout také těchto problémů, je již třeba znát základy činnosti běžných nástrojů. Proto se nyní podrobněji zaměřme na možnosti řešení a rozbor činností nejjednoduššího z dosud uvedených nástrojů, nástroje jednohlasého.

#### Jednohlasé elektronické nástroje

Čemu se vlastně říká jednohlasý nástroj? Jak se na něj hraje? Je to takový nástroj, jehož vnitřní systém umožňuje produkovat v reálném čase pouze jediný tón. Je-li opatřen manuálem, pak na tento nástroj můžeme hrát tak, že vždy stiskneme pouze jedinou klávesu; na první pohled vidíme ve srovnání např. s klavírem drastické omezení techniky hry. Přesto se tuto nástroje dosud vyrábějí výhradně – nejzávažnějším důvodem jsou nízké výrobní náklady. Jsou často užívány dětmi, které s jich prostřednictvím seznámuji s hudebním čítáním. Jsou-li jednohlasé nástroje k vnitřní řešení, znějí dobré ve spolupráci s jinými nástroji. Z tohoto důvodu a také jako vhodný úvod do problematiky elektronické hudby jsou častým předmětem amatérské realizace.

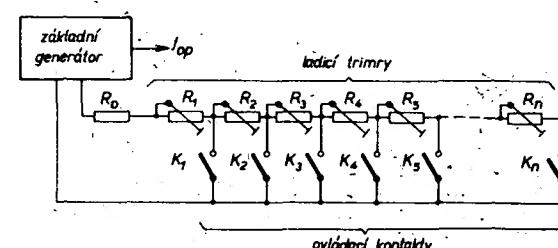
Přes svoji jednoduchost mohou být tyto nástroje řešeny různě. Probereme si nejprve jejich tradiční, ustálené uspořádání. Blokové schéma je na obr. 11.

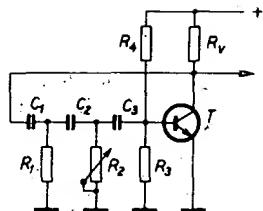


Obr. 11. Klasické blokové schéma jednohlasého nástroje

Elektrickou analoga akustického zdroje tónu určité výšky je generátor signálu opakovacího kmitočtu, tvorící základ nástroje. Zpravidla se používá pouze jeden, i když to není podmíinkou. Typickým znakem generátoru jednohlasého nástroje je jeho nespojitá činnost. Znamená to, že v klidovém stavu nepracuje nebo kmitá v nadzvukové oblasti, do činnosti se uvádí až stiskem klávesy. Požadavky na ostatní vlastnosti generátoru jsou velmi mírné. Není zde nijak zvlášť kritická otázka kmitočtové stability, protože nástroj nemůže hrát více tónů a je dále obvykle opatřen prvkem, umožňujícím doladit manuál v potřebném rozsahu. V širších

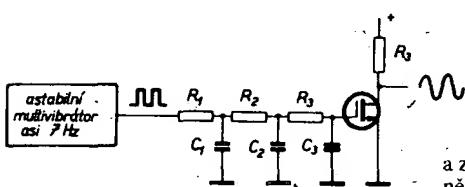
z populárních zapojení, užívané často v elektronických nástrojích, je na obr. 13. Činnost tohoto obvodu, využívajícího emitorové vazby, je jednoduchá. Potenciál báze  $T_1$  je určen dělícím poměrem  $R_{B1} : R_{B2}$ . V klidovém stavu (při rozpojeném kontaktu) je tranzistor  $T_1$  zavřen, na jeho kolektoru je téměř plné napájecí napětí. Proto je otevřen emitorový





Obr. 15. Klasické schéma infrazvukového generátoru, vytvářejícího modulační signál pro vibrato

tranzistory typu KC; ze stejného důvodu se často používá Darlingtonovo zapojení. Nedorozdílem tohoto klasického řešení jsou problémy s tolerancemi součástí při oživování, navíc se obtížně zajistuje stabilní funkce, má-li být výstupní signál přesně harmonický. Proto se používají i jiná zapojení, využívající např. kmitočtové filtrace signálu pravoúhlého průběhu, vytvářeného jednoduchým astabilním multivibrátorem (obr. 16).

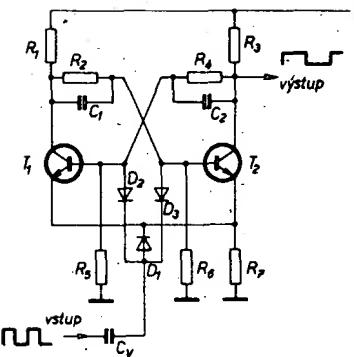


Obr. 16. Jiný princip vytváření sinusového infrazvukového signálu

Základní oscilátor se zpravidla kmitočtově moduluje tak, že se modulačním signálem působí na signál opakovacího kmitočtu pouze v jedné části ( $t_A$  nebo  $t_B$ ) periody signálu. Přitom se obvykle ovládá signál určité napěťové úrovni, na níž je citlivá doba trvání příslušného úseku generovaného signálu. Tak např. u generátoru na obr. 12 se superponuje modulační signál na kolektorové napětí  $T_2$  v době uzavření tohoto tranzistoru. Při proudu výstupu generátoru vibrátového kmitočtu je linearita kmitočtového rozmitání dobrá. V jiném zapojení základního generátoru (obr. 13) ovládá modulační signál okamžitou úroveň referenčního napětí báze  $T_1$ . Také zde je předpokladem dosažení dobré linearity velký poměrný vnitřní odpor zdroje modulačního signálu, což ostatně souvisí s požadavkem minimálního rozladění (kmitočtové odchylky) při zapnutí (vypnutí) vibrata. Kmitočtový zdroj se obvykle (i v uvedených případech) ovládá změnou úrovni modulačního napětí. V obou uvedených příkladech musí být modulační signál závěrem stejnosměrné složky. Nevhodná pro základní tónové generátory jsou taková zapojení, u nichž nelze vymezit vliv modulačního signálu do samostatně definované oblasti časového průběhu. V těchto případech dochází k sirkové modulaci, kmitočtové rozmitání je buď nulové, nebo nelineární. Zdůrazněme, že stále máme na mysli pouze běžné impulsní generátory.

Mohli jsme si již povídat jednoho z nejvýraznějších technických nedostatků jednohlásného klávesového nástroje – tím je velký počet nastavovacích prvků (jeden pro každou klávesu). Tato skutečnost je sice vyvážena celkovou jednoduchostí a láčí konstrukce, ale značně komplikuje seřízení i stabilitu nástroje. Teoreticky lze zjednodušit nastavování v systému vycházejícího z charakteru temperovaného ladění, u něhož oktávový poměr dvou libovolných tónů přesně rovní dvěma. Stačilo by tedy ladit pouze dvanáct tónů nejvyšší oktávy a všechny potřebné tóny nižší vytvářet postupným dělením odpovídajícího tónu dvěma, čtyřmi atd.

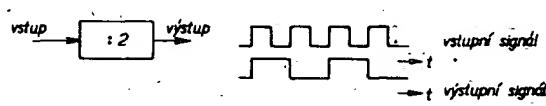
To by ovšem vyžadovalo složitější (vícenásobný) spinaci systém pro každou klávesu. U jednohlásých nástrojů, které mají rozsah dvou až tří oktáv, by toto řešení jistě nebylo zdůvodněné. Nicméně touto neprímou cestou jsme se dostali k dalšímu výraznému obvodovému prvku elektronických nástrojů – dvojkovému (binárnímu) kmitočtovému děliči. V různých souvislostech bývají tyto dělice nazývány také oktávové nebo stopové, jejich charakteristikou vlastnosti je schopnost dělit opakovací kmitočet impulsních signálů dvěma. Existují různé varianty těchto obvodů, my však budeme vždy užívat děliče s pravoúhlým průběhem výstupního signálu vzhledem ke spolehlivosti a perspektivním vlastnostem. Znázornění vzájemných časových poměrů vstupního a výstupního signálu tohoto děliče je na obr. 17. V jednohlásých nástrojích jsou dělice nejčastěji řešeny na principu bistabilních klopových obvodů s tranzistory. Dělič musí spolehlivě pracovat v širokém rozsahu změn opakovacího kmitočtu vstupního signálu. Klasické zapojení je na obr. 18, jeho činnost je tak jednoduchá



Obr. 18. Možné zapojení jednoho dělicího stupně s diskrétními součástkami

Formantová oblast v okolí 3 kHz dává nástroji stříbřitý, zvonivý charakter. Výrazný a rovnoměrný podíl vyšších harmonických

Obr. 17. Princip a časové průběhy impulsních stopových děličů



a známá, že se jí nebude zabývat. Podtrháme pouze, že vstupní signál musí mít strmou spouštěcí hranu a určitou minimální napěťovou úroveň, aby jeho derivace mohla zajistit spolehlivé překlápení. Z těchto i jiných důvodů je často mezi generátorem a děličem klopový obvod s napěťovou hysterézí (Schmittův obvod) nebo jednoduchým spinacem, pracující jako napěťový omezovač vstupního signálu (např.  $T_3$  na obr. 12).

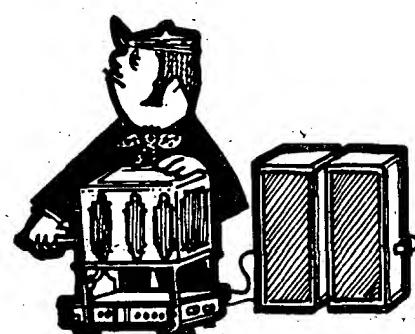
Zmiňme se nyní konkrétněji o řešení zvukového zabarvení – stručným popisem základních metod jsme se zabývali v kapitole Elektronická syntéza barvy zvuku. Nejvhodnějším systémem, který by teoreticky plně vyhovoval pro realizaci potřebného spektrálního složení komplexního signálu, je harmonická syntéza. Pokud bychom chtěli napodobit zvuk některého nástroje, mohli bychom postupným rozbořením jeho spektra v příslušných tónových oblastech (např. spektrálním analyzátoru) vyseřit odpovídající úrovně jednotlivých harmonických složek, podlejíci se na tvorbě tohoto signálu, čímž bychom současně získali i požadovaný tvar přenosové charakteristiky formantového filtru. Práce založená na podobném zkoumání zvukových signálů již přinesly řadu cenných poznatků. Bohužel, nejdůležitějším a zcela logickým zjištěním je, že pro opravdu věrné napodobení širšího souboru nástrojů je počet potřebných harmonických složek technicky neúnosný. Přesto však jsou výsledky harmonické analýzy velmi důležité a jsou východiskem pro řešení jiných systémů.

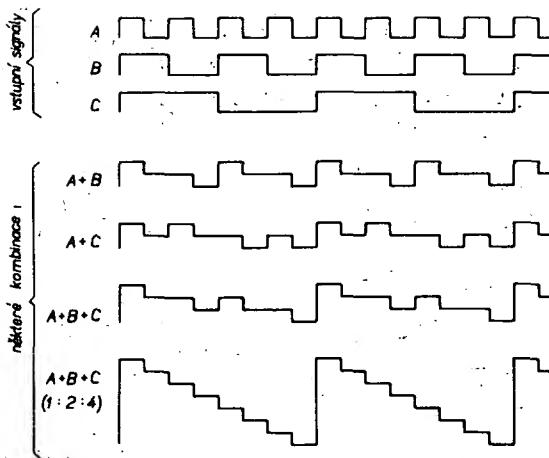
Je např. známo, že nejmenší obsah harmonických složek mezi nástroji mají jednoduše píšťaly nebo flétny; jejich zvukové zabarvení je měkké, časový průběh se velmi blíží sinusovému. To si ostatně můžeme ověřit sami, „pískneme-li“ si odpovídající signál z tónového generátoru. Naproti tomu treba klarinet má výrazně potlačený spodní harmonické složky poměrně bohatého spektra. Pro napodobení tohoto zabarvení cestou selektivního výběru je třeba potlačit dolní části odpovídajícího kmitočtového rozsahu, např. pomocí horního kmitočtového propusti. Rezonanční (formantové) zvýraznění okolí čtvrté harmonické je obecně charakteristické pro jazzové a strunné nástroje, konkrétní rozlišení nástroje je určováno především posuvem a kvalitou formantové oblasti. Pro smyčcové nástroje je charakteristická potlačená formantová oblast s minimem v okolí 1 kHz:

složek se zase projevuje ostrým, až nepřijemným charakterem zvuku.

Výhodu exaktního stanovení potřebné spektrální skladby akustického signálu používají pouze některé drahé koncertní nástroje, které však v současné době ustupují do pozadí. Ukázalo se, že rozsah možných zabarvení, jehož je možno u těchto nástrojů dosáhnout, není vždy atraktivní, nástroje jsou většinou využívány v několika charakteristických zvukových polohách. Velmi podobných výsledků se dosahuje levnější a jednodušší cestou – registrací syntézou, která byla dovedena, také díky poznatkům z výzkumu harmonické syntézy, do velmi pokročilého stavu.

Jíž dříve jsme si uvedli, že teoreticky dobré předpoklady pro tvorbu zvukového zabarvení má systém selektivního výběru, ovšem pouze tehdy, má-li vstupní signál bohaté a rovnoměrné spektrální složení. Jako příklad jednoduchého periodického průběhu, blížícího se této vlastnosti, jsme uvedli signál pilovitého průběhu, získat však stabilní signál pilovitého průběhu v širším kmitočtovém rozsahu je poměrně obtížné. Podobný signál s ještě bohatším spektrálním složením je však možno získat lineární kompozicí různého počtu signálů pravoúhlého průběhu, jejichž opakovací kmitočty jsou v oktávovém poměru. Přidáním dalších oktávových složek je možno v širokém rozsahu ovlivňovat tvarový průběh a tím i spektrální složení





Obr. 19. Názorné příklady vytváření různých časových průběhů kombinacemi synchronních signálů A, B, C. První tři příklady ukazují možnosti lineárních kombinací sestojnými poměry zúčastněných signálů. Stejný význam však mají i vahy těchto signálů. To ukazuje čtvrtý příklad - vahami signálů A : B : C = 1 : 2 : 4 je vytvořena sedmistupňová approximace pilovitého průběhu

výsledného signálu. Příklady některých uvedených kombinací jsou na obr. 19.

Další důležitá úprava výsledného signálu spočívá v tom, že jednotlivé oktaové složky mohou mít nejrůznější spektrální obsah a mohou se směšovat v nejrůznějších poměrech. V tom je vlastně podstata technické realizace registrévy syntézy. Základním průběhem každého vstupního signálu je obvyklé průběh pravoúhly. Ten může být známými způsoby upravován na řadu jiných signálů s odlišným spektrálním složením. Kmitočtově závislými obvody lze např. snadno upravit signál pravoúhlého průběhu na trojhelníkovitý nebo sinusový, nelineárními obvody lze průběh signálu konvertovat na pilovitý atd. Kombinace registrévy syntézy s formantovými obvody dává skutečně dobré předpoklady pro tvorbu variabilních a kvalitních zvukových signálů.

Mnohdy se používají zjednodušené varianty registrévy syntézy, zvláště u nástrojů s omezeným počtem registrů. Prioritu podle přístupu k řešení pak mají buď formantové obvody, nebo se vychází ze směšovacích poměrů jednotlivých základních složek. Obě cesty umožňují výrazně zjednodušit rejstříkové obvody při zachování dobrých zvukových vlastností nástroje pro běžnou použití.

Všimněme si znova, že obvody, jimž jsou generovány vstupní signály pro registrévu syntézu, jsou kmitočtové děliče. U elektronických nástrojů jsou výstupní signály jednotlivých děličů označovány jako stopy. Nezcela správně je zavedeno pravidlo, že nejvyšší kmitočet, odebírány z celého řetězu (obr. 8), bývá označován jako stopa 2'. Následují obvykle stopy v pořadí 4' - 8' - 16' atd. Podle logičtějšího označování, odvozeného od rozdílu píšťal klasických varhan, patří registru, začínajícímu tónem C, kontraktávy stopa 16'; registru, začínajícímu tónem C velké oktavy stopa 8', dále pak 4', 2' a 1. Registrum z hlediska používání nástroje označujeme zařízení (sklopku, spínač), jímž zařazujeme do znějícího signálu příslušné stopy. První stopové označení je výhodné z hlediska orientace v elektronických obvodech.

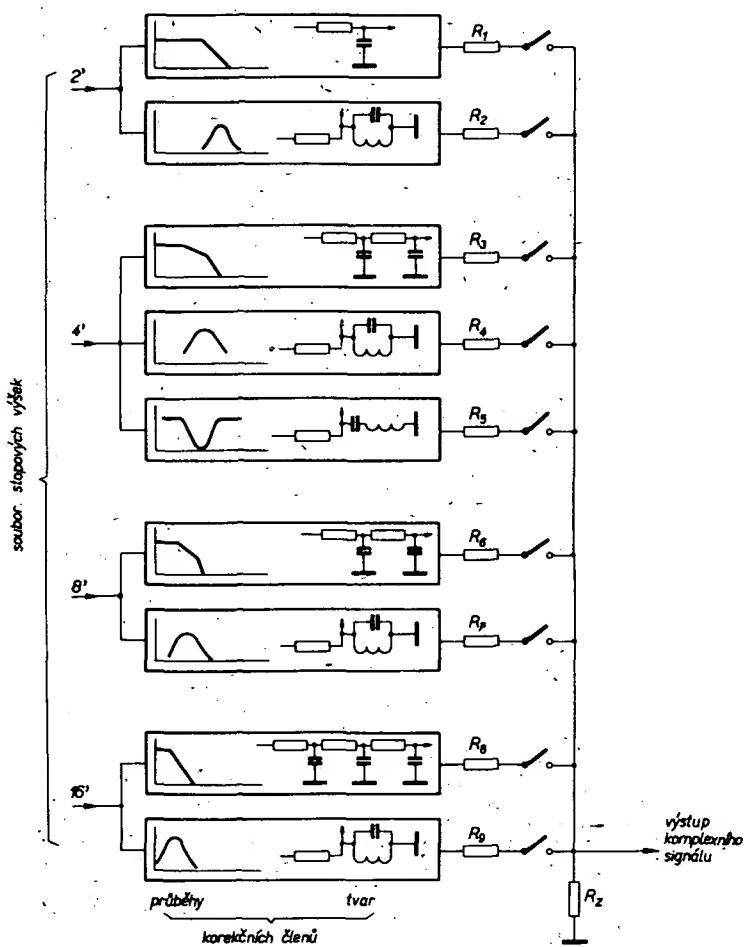
Signály jednotlivých stopy jsou v souladu s předchozími úvahami zaváděny do registrévy rejstříků, v nichž se spektrálně upravují. Symbolické znázornění klasické úpravy rejstříkového obvodu jednoduchého nástroje je na obr. 20. Užití naznačených spínačů umož-

tón o oktavu nižší. Z toho vyplývá, že takto koncipovaný nástroj umožňuje posouvat znějící oktaový rozsah v poměrně širokém intervalu, daném prakticky počtem použitých stop. Nástroje však většinou pracují s využitím registrévy syntézy, s kombinováním využitím všech nebo několika stop. K operativnímu výběru jednotlivých registrů nebo jejich kombinací slouží registrévy ovladače (sklopky nebo tlačítkové přepínače). K dobrému nástroji patří i kvalitní vyrovnání dynamických úrovní jednotlivých registrů.

Všimněme si ještě jedné zajímavé skutečnosti. Často se k úpravě výsledného akustického dojmu potlačuje úroveň některých stop. Subjektivně pak zářez mezi zvukovým projevem obvykle do oktavy, příslušné nejvyraznější složce, např. stopě 8'. Přesto se na komplexním signálu podílejí také stopy vyšší, např. 2' nebo 4'. Hudebně cítený kmitočet však odpovídá stopě nižší. Stopy 2', 4' jsou tedy skutečně oktaovými násobky subjektivně vnímaného základního tónu, stejně jako jejich spektrální složení má odpovídající podíl na skladbě komplexního signálu. Stopy 2', 4' se v těchto případech nazývají někdy předřadné stopy. Je-li však nejvyraznější složkou signálu stopa nejvyšší, jsou ostatní stopy v poměru k této základní stopě oktaovými zlomky. V zahraniční literatuře se také nazývají doplňkové.

Toto oboustranné ovlivňování podílu jednotlivých stop na charakteru komplexního signálu je plně v souladu s principem registrévy syntézy, je však třeba si uvědomit vliv vnímaného podílu energetických úrovní jednotlivých stop na subjektivní hodnocení relativní výšky a čistoty vnímaného tónu.

Na závěr povídání o registrévy syntéze si uvedeme orientační příklady vhodných regis-



Obr. 20. Princip registrévy volby (odpory R<sub>1</sub> až R<sub>9</sub> slouží k vyrovnání nesítostí jednotlivých stop)

STOPA	FILTR	NÁSTROJ
2'		píkola
4'		flétna
		smyčce
		kornet
8'		flétna
		smyčce
16'		flétna
		lesní roh

Obr. 21. Několik jednoduchých registrových obvodů

trových filtrů jednotlivých stop pro napodobení některých nástrojů. Příklady, znázorněné na obr. 21, vycházejí ze vstupního signálu pilovitého nebo i pravouhlého průběhu a zanedbatelného vnitřního odporu zdroje. Rovněž není uvažován vstupní odporník zátěže.

Signál, vytvářený některým ze způsobů, které jsme si uvedli, je u řady nástrojů již přímo zpracován v úrovnovém a výkonovém zesilovaci. Takové řešení však nerespektuje jednu zvláštnost elektronických nástrojů, u nichž jsou jednotlivé tóny ovládány kontaktným způsobem. U takového systému, má-li mít určité kvalitativní parametry, je nutno nějakým způsobem zabránit vzniku nebo uplatnění rušivých jevů, vznikajících při stisku nebo uvolnění klíkys. Vzhledem k závažnosti tohoto problému se jeho řešení budeme věnovat v samostatné části.

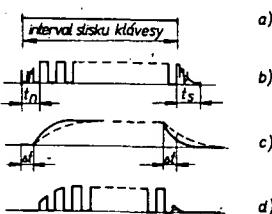
### Klíkys u jednohlasých nástrojů

Dosud jsme mléčky přecházeli problém tvorby nebo ovlivnění časového průběhu modulační obálky jednotlivých tónových intervalů. Dále si ukážeme, že u jednohlasých nástrojů s kontaktním ovládáním úprava modulační obálky v širších souvislostech, bez dízvukového zařízení, není ani možná. Je zde však ještě jeden důvod, pro který je třeba si důkladnější všimat definice tónového intervalu – tím je lze rušivých signálů, obvykle označovaných jako klíkys. Zůstává paradoxe, souvisící s technickými problémy, že u jednohlasých nástrojů klíkys často potlačovány nejsou, ačkoli právě při jednohlasé hře jsou nejvýraznější a mimořádně negativně ovlivňují výsledný dojem. Na tuto otázku je v literatuře obtížně najít uspokojivou odpověď, protože příčinu vzniku klíkys je více a názory na jejich původ a metody odstranění jsou u jednotlivých autorů často v rozporu.

Pokusme se proto o hlubší rozbor. Co to vlastně jsou klíkys? Klíksem budeme vždy rozumět nežádoucí efekt, vznikající při náhlém (např. kontaktném) spínání nebo rozpínání řetězu akustického signálu. Není rozdružující, je-li tímto způsobem uváděn do

činnosti akustický zdroj (generátor), nebo je-li ovládána cesta signálu do zdroje. Příčinou klíkys jsou přechodové jevy. Jejich charakter je obvykle složitý, prakticky náhodný. Omezme se nyní na nástroje s ovládánými generátory, tedy s nespojitéou činností.

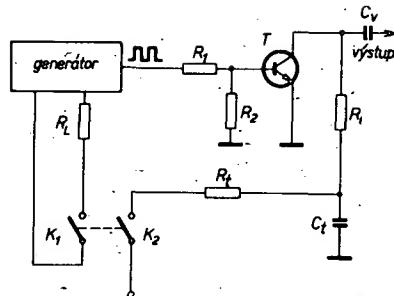
Stisk klíkys vymezuje interval, po který má nástroj generovat požadovaný tón (obr. 22). Při tomto časově nahodilém sepnutí



Obr. 22. Potlačení klíkys u jednohlasých nástrojů

klíkys generátor vychází ve srovnání s ustáleným režimem z nedefinovaných počátečních podmínek, závislých na konkrétním zapojení, době setrvání v klidové poloze atd. První nebo několik počátečních impulů má časově nedefinovaný a mnohdy také amplitudově nestabilní průběh. Podobně je tomu i při rozpojení spínače klíkys. V obou případech se na další komplikaci charakteru klíkys výrazně podílejí mechanické rezonance a zakmitání spínací soustavy (jazýčkových-kontaktů); je možno ověřit, že i u velmi kvalitních mžíkových spínačů jsou některé složky těchto zámků velmi rychlé a prakticky neodstranitelné. Vedle úplného rozpinání nebo spínání kontaktů se vlivem zámků výraznou měrou uplatňují také diferenciální změny přechodového odporu kontaktu. (Vliv přechodového odporu by ostatně měl být zahrnut také do rozvahy kmitočtové stability nespojitého generátoru.) Je zřejmé, že příčinu vzniku klíkys v konkrétním případě je vždy celá řada, což znesnadňuje identifikaci a lokalizaci ohnisek jejich vzniku. Typické pro vnitřní kombinované klíkys jsou nejvýraznější pazvuky na počátku a ukončení tónového intervalu, připomínající skřípání nebo praskot.

Jakým způsobem se klíkys odstraňují? Řekněme rovnou, že jejich úplné odstranění, stejně jako výraznější ovlivnění modulační obálky jednotlivých tónů je prakticky nemožné. Důvodem je okamžitá reakce generátoru na spínací systém klíkys. Víšme si obr. 22b. V okamžiku stisku klíkys přechází generátor z klidové polohy do pracovní, což je po určité době, než dosáhne ustáleného režimu, doprovázeno přechodovými jevy, klíkys. Stejně při uvolnění klíkys je mžíkové přerušení ustálená činnost, přechod do klidové polohy je opět doprovázen klíkys. Chceme-li klíkys odstranit, je nutno v intervalech  $t_1$ ,  $t_2$  potlačit přenos, např. omezením zisku zesilovače. K tomuto účelu je možno využít libovolného zesilovacího stupně, který pak pracuje jako tzv. omezovač klíkys. Typický příklad je znázorněn na obr. 23. Časový průběh napěťového zisku tohoto stupně je programován vnitřním uspořádáním a odvozován od stavu manuálu (polohy klíkys). Princip činnosti je jednoduchý. Jsou-li rozpojeny oba kontakty  $K_1$ , generátor nekmitá a oddělovač nepracuje, protože není napájen. Po stisknutí klíkys se generátor rozkmitá, čímž vznikne klíks. Oddělovač má však v počátečním stavu minimální zisk, protože jeho napájecí napětí se zvětšuje s určitou časovou konstantou, určenou prakticky prvkem  $R_C$ . Plný zisk může mít teoreticky kdykoli (podle volby časové konstanty) po proběhnutí klíkys. Tím bychom také mohli získat libovolný tónový náběh. Aby však bylo

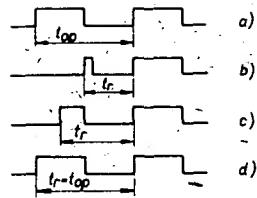


Obr. 23. Oddělovač klíkys, využívající ovládaného rozkmitu výstupního napětí (napěťový omezovač).  $K_1$  spiná vzhledem ke  $K_2$  s předstihem, naopak  $K_2$  se rozpojuje s předstihem vzhledem ke  $K_1$ :

tónového intervalu, musí mít kontakt, ovládající oddělovač, určitý reakční předstih před kontaktem, ovládajícím generátor. Toho se dosahuje tím, že jsou oba kontakty mechanicky upraveny tak, že kontakt  $K_2$  rozpíná vzhledem ke  $K_1$  s určitým časovým předstihem. Snadno nahlédneme, že z mechanických důvodů může být pro běžnou techniku hry tento předstih pouze nepatrný, rádu ms. Při velké časové konstantě reakce oddělovače vidíme z obr. 22c, že by nebyl vůbec potlačen klíks na konci tónového intervalu. Proto je nutno ve srovnání s polyfonními nástroji volit pouze velmi krátkou časovou konstantu. Z těchto důvodů je také možno divat se na klasický oddělovač jako na anachronismus, převzatý od polyfonních nástrojů, u nichž jsou ovšem podmínky pro jeho činnost zcela odlišné. Na druhé straně je zřejmé, že najít vhodnější způsob řešení je obtížné.

Ráda našich i zahraničních konstruktérů používá u těchto nástrojů k potlačení klíkys mj. oddělovač kondenzátory, omezující přenos nízkých kmitočtů. Toto řešení považují za nelogické, protože spektrum klíkys má výrazný podíl vyšších harmonických složek. Oddělovační kondenzátory jsou vhodné především u nástrojů, vybavených oddělovači – pak lze jimi skutečně potlačit klíkys, vznikající impulzy kolektoričkového napěti oddělovače v závislosti na jeho ovládání kontaktem  $K_2$ . Vzhledem k omezené velikosti časové konstanty tyto impulzy zasahují do akustického spektra. V každém případě však oddělovační kondenzátory potlačují vlastně druhotné klíkys, zaváděné do signálu použitím oddělovače. Je zřejmé, že při návrhu oddělovače nebo při posuzování vhodného zapojení je třeba poštipovat uváženě.

Sám se domnívám, že nemůžeme-li v rozsahu, kterým ovlivňujeme průběh modulační obálky, měli bychom se především zaměřit na co nejdokonalejší potlačení neperiodických jevů ve vztahu ke generovanému signálu, protože náběh či dozvívání melodicích skupin zlepšuje také regulátor dynamiky a trikové efekty. Navíc se stále častěji žádá různé nasazení tónu, ovšem čisté, bez klíkys. Když jsem chtěl posoudit možnosti této cesty, vycházel jsem ze subjektivního hodnocení tónového intervalu při němž jsem vzhledem k způsobem eliminoval vliv kontaktů a ostatních přechodových jevů na okrajové oblasti. Hodnocení se zúčastnilo několik posluchačů. Akustický signál pravouhlého průběhu se střídou 1 : 1 s možností plynulého fázového posuvu s velkou náběžnou rychlosí byl spinán v různých vztazích k náběžné hraně prvního impulsu. Totéž jsem ověřoval i ve vztahu k sestupné hraně posledního impulsu.



Obr. 24. Různé možnosti startu intervalu impulsu: a) kontinuální signál, b), c), d) možné příklady, vhodný je pouze příklad d)

Současně jsem zamezil jakékoli kolísání výstupní úrovni mezi nulovou a špičkovou hodnotou výstupního signálu. Výsledek testu potvrdil předpoklady. Pokud se na počátku nebo konci sledu impulsů vyskytl být i jen jediný a krátký impuls rozdílné doby trvání  $t_r \neq t_{top}$  (obr. 24), byl dojem vždy poznáván jakýmsi „škrábnutím“, značně nepřijemný. Důvod je zřejmý, je jím zcela odlišné spektrum tohoto signálu ve srovnání se signálem neperiodického intervalu. Pokud bylo spínání upraveno tak, aby byl signál ovládán přesně s hranou prvního nebo posledního vybraného impulsu, tento rušivý jev zmizel. Ovšem ani při dokonalem synchronním spínání není pocit z poslechu dokonalý. Tím, když zmizí charakteristický praskot a lupání, náběh a dozvětní tónu jsou provázeny jakýmsi zhoupnutím, vznikajícím náhlohu dynamickou změnou, jejím ostrym náběhem. Shodli jsme se na tom, že výrazně-

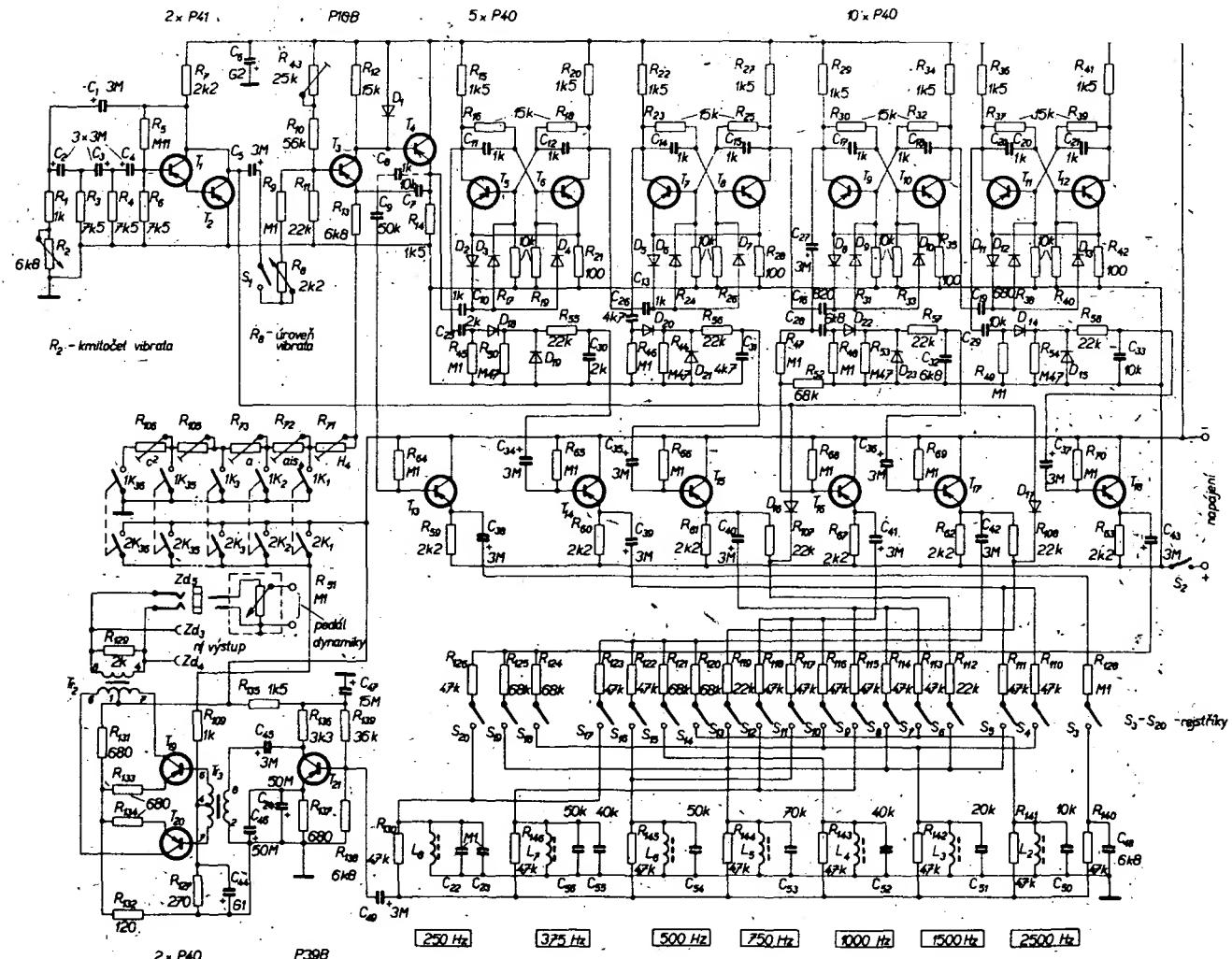
ší je tento efekt při ukončení tónového intervalu, při „skoku do prázdné“. Určitý vliv zde má i spektrální složení zkoumaného signálu. Mnohem výrazněji se však uplatňuje vliv opakovacího kmitočtu, což je opět zcela logické. Se snižujícím se kmitočtem je i dojem břitkosti tónového nasazení nebo dozvětní méně výrazný. Při opakovacím kmitočtu nižším než asi 800 Hz je výsledný dojem naprostě uspokojivý. Je-li základní signál podložen dalšími stopami, které jsou jeho oktaovými zlomky, pak jsou výsledky ve srovnání s užitím oddělovače velmi dobré, neprojevují se žádné rušivé efekty (až asi do 2500 Hz). U vyšších kmitočtů se opět zvolna začíná projevovat typické „houpaření“, i pak však jen čisté, bez průvodních znaků kliksu. Je samozřejmé, že odstranit vliv základního spínání a přechodových jevů generátoru je u běžných generátorů složité. Při použití vhodných konstrukčních prvků je však zásadně možné; podobné řešení jsem použil v praktické konstrukci.

### Zapojení jednohlasého nástroje

I když se dále nebudeme zabývat popisem továrních nástrojů, učiníme výjimku. Pomůže nám uvědomit si podrobněji všechny souvislosti, které jsme dosud uváděli a ukáže také, že v konstrukci jednohlasého nástroje, má-li mít solidní vlastnosti, není ještě stále něčím, co by se dalo „spíchnout“ přes noc. Doporučoval bych čtenářům, kteří se dosud žádou podobnou konstrukci nezabývali, aby si za-

pojení podrobně prostudovali. Použité obvody jsou jednoduché a pochopit jejich funkci při troše pozornosti nebude činit potíže.

Schéma na obr. 25 představuje sovětský nástroj Romantika, vybavený rozsahem tří oktav a určený pro jednoruční jednohlasou hru. Základní generátor je jeden, osazený tranzistory  $T_3$ ,  $T_4$  v zapojení emitorové vázaného multivibrátoru. Kmitočty jednohlasých tónů se nastavují odporovými trimry  $R_{71}$  až  $R_{106}$ , tóny se volí kontakty  $K_1$  až  $K_{36}$ , ovládanými jednotlivými klávesami. Generátor vibráta ( $T_1$ ,  $T_2$ ) je v běžném zapojení s fázovacími články. U tohoto nástroje je možno ovládat amplitudu a kmitočet vibrátorového modulačního signálu. Čtyřmi klopnými obvody ( $T_5$  až  $T_{12}$ ) jsou vytvářeny stopy 2', 4', 8' a 16'. Stopa 1' je odebírána přímo ze základního generátoru. U stop 2' až 16' je pravoúhlý signál upravován na pilovitý nelineárními obvody, u stopy 8' je sledovačem  $T_{16}$  vyveden také signál pravoúhlého průběhu. Ostatní sledovače impedančně přizpůsobují tvarovací obvody k rejstříkovým filtrům. Jsou to tranzistory  $T_{13}$ ,  $T_{14}$ ,  $T_{15}$ ,  $T_{17}$ ,  $T_{18}$ . Kromě odporové sítě je v rejstříkových obvodech použito sedm formantových filtrů, jednotlivé oblasti jsou značeny ve schématu. U stop 4' a 8' je v některých kombinacích možno diodami  $D_{16}$ ,  $D_{17}$  zavádět pomocnou amplitudovou modulaci infravukovým signálem, odebíraným z generátoru vibráta. Výběr zvukových kombinací je na nástroj tohoto typu značně pestrý, stopa 1' má jeden rejstříkový spínač, 2' – dva, 4' – čtvrti, 8' – osm a 16' – tři.



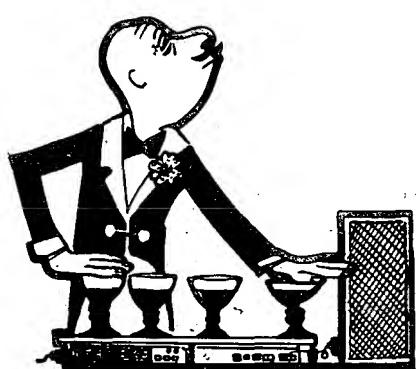
Základní funkci zesilovače s  $T_{19}$  až  $T_{21}$  je upravovat výstupní signál tak, aby mohl být nástroj připojen k běžnému výkonovému zesilovači. Ačkoli Romantika má hmotnost asi 18 kg, může bez externího zesilovače pracovat pouze se sluchátkem. Některý zesilovač kromě své základní funkce pracuje také jako oddělovač kliksů. Ovládání je zajištěno kontakty  $2K_1$  až  $2K_3$ . Kontakty  $1K$  a  $2K$  jsou vzájemně nastaveny tak, že při stisku klávesy sepně nejprve  $1K$  a pak teprve  $2K$ , při uvolnění rozpíná  $2K$  s časovým předstihem před  $1K$ . Přes kontakty  $2K$  je napájen obvod bázi symetrického zesilovače s  $T_{19}$ ,  $T_{20}$ . Při rozpojených kontaktech je stupeň zavřený, po jejich sepnutí zesilovač začíná pracovat s časovou konstantou  $R_{109}$ ,  $R_{127}$ ,  $C_{44}$ . Při rozpojení  $2K$  (s časovým předstihem před ukončením tónového intervalu) se potlačuje klick zmenšením zisku symetrického zesilovače. Vzhledem k jednoduchosti se dalším popisem nástroje zabývat nebude. Je samozřejmé, že napájecí napětí musí být stabilizováno. Snad ještě pro orientaci uvedeme, že technologicky je nástroj řešen na čtyřech deskách s plošnými spoji. Na jedné je základní generátor, generátor vibrata a první kmitočtový dělič, na další tři děliče, na třetí všechny emitorové sledovače a konečně na čtvrté rejstříkové obvody a zesilovač. Příslušenstvím nástroje je pedál k ovládání dynamiky.

### Zvláštnosti jednohlasých nástrojů

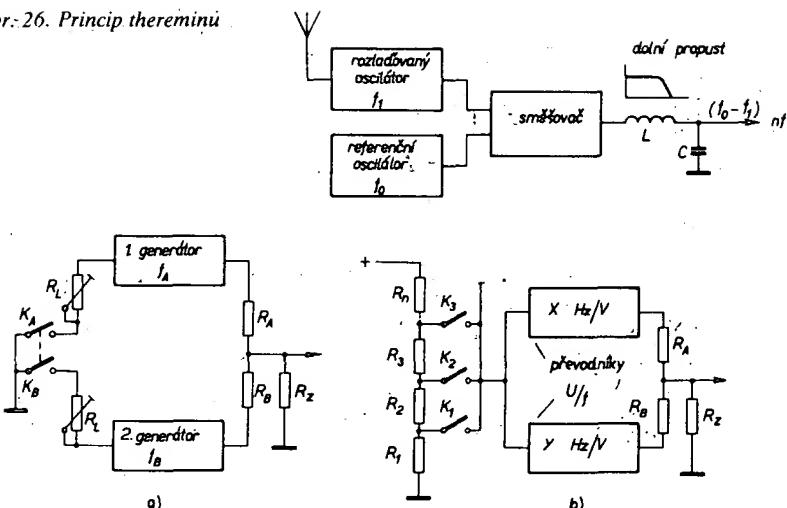
V praxi se samozřejmě můžeme setkat s různými způsoby řešení i aplikací nástrojů. Všimneme si několika nejzajímavějších.

Jako generátor tónového signálu jsme dosud uvažovali astabilní multivibrátor. Vhodná jsou i jiná řešení, zajímavým příkladem je nástroj Solovox fy Hammond, v němž jako základní generátor pracuje oscilátor  $LC$ . Ladici kondenzátor je neměnný, přepínají se cívky rezonančního obvodu, jejich dočerpací jádry lze snadno nastavit jednotlivé tóny. Princip generátoru  $LC$  umožňuje dosáhnout velké kmitočtové stability, přináší však i některé problémy (obtížnější zavádění kmitočtového rozmitání, vibrata, u generátorů s extrémní stabilitou).

Dosud jsme také uvažovali ovládání generátoru kontakty. Toto řešení, i když je poměrně dobré a především levné, má, jak jsme konečně poznali, také řadu nedostatků. U nástrojů se občas můžeme setkat i s jinými způsoby ovládání. Zapojení, reagující na dlaní prstu, pracují např. na kapacitním nebo fotoelektrickém, popř. i jiných principech. Většinu praktických konstrukcí tohoto typu můžeme dosud považovat spíše za technickou kuriozitu vzhledem k vysokým nákladům a většinou negativnímu vlivu na kmitočtovou stabilitu. S rozvojem aplikace senzorových prvků se však jistě i v této oblasti a zvláště u nástrojů vyšších kvalitativních skupin dočkáme odchodu od kontaktového ovládání.



Obr. 26. Princip thereminu



Obr. 27. Realizace chórového efektu; a) s klasickými rexalačními generátory, b) s generátory konverzního typu

Zvláštní skupinu jednohlasých nástrojů tvoří bud samostatné systémy nebo části složitějších nástrojů, u nichž se výška tónu ovládá plynule. Jako příklad můžeme zvolit reminiscenci z pravého elektronických nástrojů - efektní záznamový systém, dodnes nazývaný podle svého původce Theremin. Tento nástroj byl ovládán pohybem ruky v prostoru kolem záhadné skřínky. Blokové schéma je na obr. 26. Dva vysokofrekvenční oscilátory se shodným základním pracovním kmitočtem  $f_0 = f_1$  mají nulový záznam. Jeden z generátorů je opatřen cílem (kapacitním snímačem, malou antéknou ap.), umožňujícím vhodným způsobem ovlivňovat jeho rezonanční kmitočet. Při  $f_0 \neq f_1$  je možno kmitočtovou filtrací oddělit od základních signálů a ostatních směšovacích produktů dolní-rozdílovou složku ( $f_0 - f_1$ ), odpovídající tónovému signálu. Výška tónu je tedy úměrná stupni rozladění generátoru  $f_1$ ; charakter akustického signálu je prvotně závislý na průběhu směšovací charakteristiky. Plynulé změny tónu samozřejmě můžeme dosáhnout i s multivibrátorem, u kterého plynule ovládáme ladící prvek, např. odporník (potenciometr).

V současné době se v hudebních nástrojích začíná uplatňovat nový způsob generování tónového signálu. Je jím aplikace převodníků napětí-kmitočet, přičemž výstupní signál může produkovat současně několik základních periodických průběhů a tím také mohou být využívány jejich vzájemné kombinace. Převodníky  $U/f$  jsou často nazývány také napěťové řízené oscilátory - VCO (voltage controlled oscillators). Rozdíl aplikace VCO od klasických generátorů je především v tom, že se pro změnu výšky tónu nevyužívají úpravy některého diskrétního ladícího prvku, ale kmitočet se mění úpravou vstupního, řídícího napětí. Tento princip přináší řadu nových možností do syntetické tvorby hudebních signálů. U jednohlasých nástrojů by se např. s použitím vzorkovacích obvodů typu sample and hold mohly zcela odstranit problémy s kliksy. Převodníky  $U/f$  stejně jako ostatní příslušné obvody jsou u nás v integrované formě dosud nedostupné. Návrhem a problémy tohoto zapojení s běžnými součástkami jsem se zabýval v [18]. Tuto stručnou zmínu o VCO si doplníme později, zatím stačí uvědomit si, že je možno precizně definovat kmitočet tónu v závislosti na vstupním analogovém napětí.

V souvislosti s jednohlasými nástroji si objasněme ještě princip zvukového efektu, nazývaného chorus, který je obdobou dojmu, jaký získáváme například při poslechu varhanního koncertu v prostorách kostelů, kde se zvuk šíří mnoha nejrůznějšími směry

a odrazy. Tento efekt je však v klasické formě užíván pouze u nejdražších nástrojů vzhledem k technické náročnosti a vysokým nákladům. Realizace efektu, znázorněná na obr. 27, spočívá na vytvoření záznamů dvou velmi blízkých kmitočtů  $f_1$  a  $f_2$ . Na obrázku jsou znázorněny dva generátory. První je laděn přesně na kmitočet žádaného tónu, druhý je od tohoto kmitočtu nepatrně rozladěn. Potom kromě hranných tónů vnímáme ještě akustické záznamy, určené okamžitými ampliduovými rozdíly odlišných kmitočtů generátorů. Charakter záznamů je proměnný, protože časový průběh obou signálů je asynchronní. Chorusový dojem je obvykle umocňován cyklickými odchylkami některého parametru, např. působením vibrata nebo tremola na signál jednoho nebo obou generátorů.

Nyní můžeme uzavřít tuto kapitolu, týkající se jednohlasých nástrojů. Závěry, které je možno si vytvořit, nám umožní věnovat se problematice nástrojů složitějších.

Nejzávažnějším omezením jednohlasých nástrojů je bezesporu možnost produkovat pouze jediný tón v reálném čase. Proto jsou často užívány buď jako vedlejší nástroje malých orchestrů, nebo jako doplňky nástrojů jiných, jako je harmonika ap. Primitivním se může zdát upozornění, že i s jednohlasým nástrojem je možno „stvořit“ vícenásobou nebo akordickou skladbu - použijeme-li zvukový záznam způsobem, umožňujícím postupnou kombinaci jednotlivých složek výsledného souzvuku. Kvalitní a efektivní realizace takové nahrávky je technicky složitá, vyžaduje řadu řídících a synchronizačních signálů atd. O této možnosti se zmíníme hlavně proto, že je v podstatě jedním z hlavních principů nové generace elektronických nástrojů - syntetizérů.

### Nástroje vícehlasé

Je logické, že možnosti jednohlasých nástrojů, přes hudební působivost jejich projektu, jsou z hlediska uplatnění v orchestru velmi omezené, solidní sólová hra je prakticky nemožná. Pro rozšíření oblasti použití bylo třeba hledat cesty, umožňující také akordickou hru. Nabízí se řešení vybavit každou klávesu samostatným generátorem, pevně laděným na příslušný tón. Tak bychom vlastně vytvořili polyfonní nástroj, jehož obdoby byly skutečně realizovány. Pokud má takový nástroj dostatečně stabilní generáto-

ry, jsou jeho zvukové vlastnosti vzhledem k fázové autonomii jednotlivých tónů obvykle vynikající. „Vynikající“ jsou ovšem i náklady a technologické problémy, spojené s realizací. Do skupiny vícehlasých nástrojů patří především systémy, tvořící kompromis mezi kvalitativními vlastnostmi a pořizovacími náklady nástrojů jednohlasých a polyfónních.

Jaký je tedy princip těchto nástrojů? Stručně řečeno, omezují vždy počet tónů, které mohou současně znít. Uvažujme např. takto: hudebník může při ovládání manuálu použít nejvíce deset prstů. Tomu prakticky odpovídá maximálně deset současně stisknutých kláves, deset znějících tónů. Kdybychom měli generátorovou část nástroje upravenou tak, aby byly kdykoli k dispozici všechny tóny, odpovídající rozsahu manuálu (což je možné s pomocí 12 oscilátorů a příslušného počtu děličů, obr. 28), stačilo by

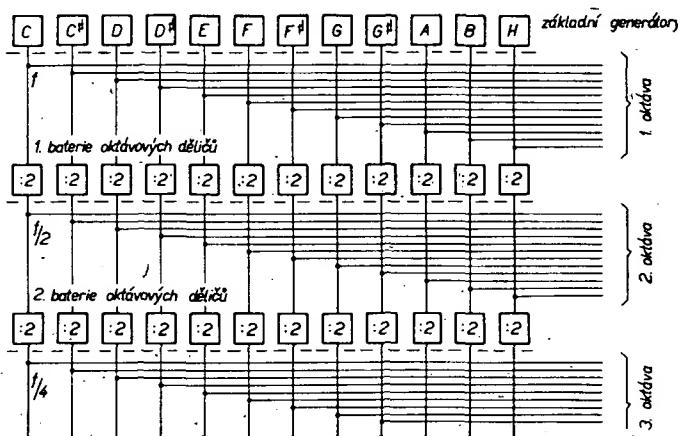
výběrem, a tím by složitost řešení přesáhla požadavky efektivní realizace. Příklad však ukazuje jeden charakteristický směr, spojený s koncepcním řešením vícehlasých nástrojů – je jím vždy určitý program, kterým jsou řízeny (a omezovány) vzájemné kombinační možnosti jednotlivých kláves (tónů). Předchozí úvahy si možná leckdo ujasní, vzpomeňme-li si na měřič elektronický TESLA BM215, jehož úpravu pro měření určitého typu elektroniky zajišťuje ve stejném maticovém uspořádání programovací karta. Výměnnou karty je zajištěna nová potřebná programová úprava. To je ovšem u hudebních nástrojů, kde se jednotlivé kombinační možnosti neustále mění, nemožné. Program, který je užíván v těchto případech, je velmi volný a spočívá především na jednoduchých úvahách z hudební teorie.

Zavedení jakéhokoli vnitřního, pevného programu do vnitřního systému nástroje vždy

interval prima – malá sekunda – velká sekunda je disonantní a jeho použití v akordické nebo jiné sestavě je výjimečné. Dále se využívá toho, že intervaly vysí je okta (nona, decima...) jsou obvykle na manuálu na mezi obsáhnutí a při jednoruční hře se ani nepoužívají. Za těchto okolností využuje pro jednoduchou akordickou hru systém, v němž je vždy interval tří sousedních půltónů, uvedený výše, zpracováván jedním z nespojité pracujících generátorů. Vždy může být vybrán pouze jeden z těchto tónů! Při tomto uspořádání je pro úplné obsažení okta zapotřebí právě čtyř generátorů. Ta kto koncipovaný systém čtyřhlasého nástroje je na obr. 30.

Nedostatky vícehlasých nástrojů bývají často nekriticky zamítovány, nebo naopak přeháněny. Konstruktér bez znalosti hudebních zákonitostí se pak v takové situaci těžko orientuje. Pokusme se alespoň stručně rozbrat praktické vlastnosti čtyřhlasého a šestihlasého nástroje. K tomu využijme tab. 7. V části A jsou rozděleny jednotlivé tóny do skupin čtyř generátorů, v části B je dvanáct tónů okta rozděleno na šest skupin, odpovídajících šesti generátorům. V části C je pak znázorněno intervalové schéma několika typů běžně užívaných akordů. Překreslíme-li si tuto tabulku a rozšířme-li ji v naznáčených místech, můžeme přiložením dílu C k dílu A nebo B a postupným posuvem základního tónu do různých poloh sledovat vliv jednotlivých systémů na věrnost zpracování požadované akordové sestavy tak, že zkoumáme, nejsou-li některé prvky (tóny) uvažované sestavy zvoleným systémem blokovány. Je samozřejmé, a také z tabulky vyplývá, že vztahy jednotlivých tónů a generátorů se ve všech okta východích přesně opakují. Pro posouzení akordové stavby až do okta východího rozsahu potom plně postačuje znázorněný dvouoktaový schematický model.

Budeme-li nejprve hodnotit klasický čtyřhlasý systém, můžeme konstatovat: základní durový akord zní plně ve všech tóninách. Je-li hrán v okta východě rozsahu (prima – velká tercie – malá tercie – kvarta), je potlačován spodní vodicí tón (prima). U nástrojů s tímto systémem je však vodicí tón obsažen ve spektru okta východěho tónu, jeho vyloučení má za následek pouze charakteristické zabarvení takto hráneho akordu, které podle mých zkušeností přijímají muzikanti bez výhrad – alterování s kvintovým rozsahem stejného akordu je výrazné a sympatické. Stejně dobře vychází z hodnocení akordy mollové, zvětšené nebo změněné. Jinak je tomu u akordů, mezi jejichž některými intervaly je rozsah menší než tři půltónové kroky. Představiteli této skupiny jsou v tabulce



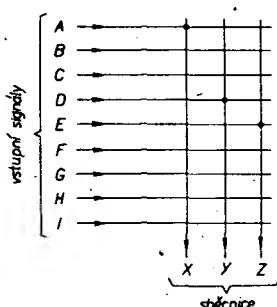
Obr. 28. Princip kmitočtové ústředny (generátor + oktaové děliče)

pouze deset dalších dělicích řetězců pro vytváření potřebných stopových výšek každé klávesy, jak to vyžaduje princip registrové syntézy. Teoretická možnost takového ovládání je znázorněna na obr. 29 (je využito

nějakým způsobem omezí techniku hry, což je mimo jiné zřejmě již z toho, že tyto systémy jsou prakticky vždy řešeny pouze pro ovládání jednou rukou.

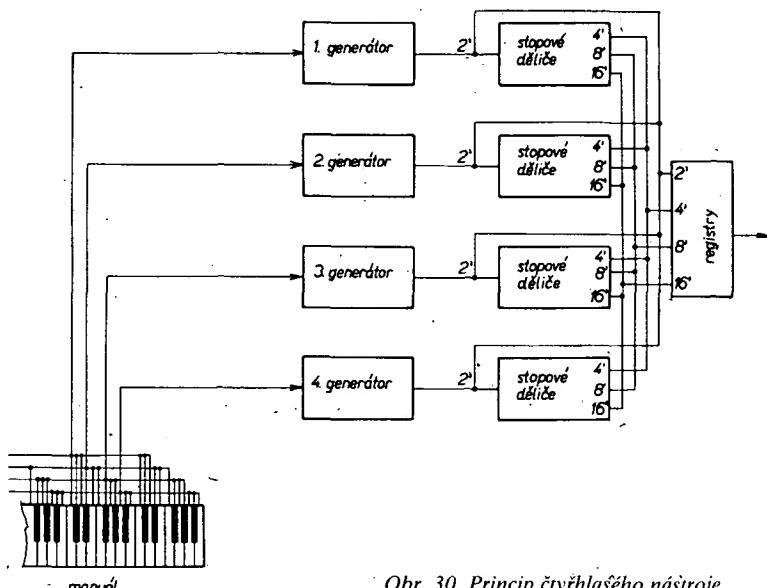
Pomínejme-li dvouhlasé nástroje, jejichž praktická použitelnost je sporná, pak nejčastějším řešením jsou nástroje čtyřhlasé. Čtyřhlasý nástroj obsahuje vždy čtyři generátory a umožňuje současně produkovat několik různých tónů. Počet těchto tónů je závislý na konkrétní sestavě a základní tónině souzvuku – v ideálním případě mohou být znějící tóny čtyři.

U vícehlasých nástrojů je základním předpokladem úpravy vnitřního systému fakt, že



Obr. 29. Princip maticového výběru

maticového uspořádání spinací sítě). Pro jednoduchost uvažujme devět vstupních signálů a tři sběrnice. Chtějme např. zavést signály A, D, E na sběrnice X, Y, Z. Je zřejmě, že činnost je možná pouze tehdy, je-li při sepnutí určité cesty, například A-X, znemožněno další sepnutí libovolného prvku prvního řádku a prvního sloupce maticy. Následující sepnutí (D-Y) by rovněž muselo znemožnit další využití zbyvajících prvků čtvrtého řádku a druhého sloupce atd. Víme jistě, že spinaci nebo jiný ovládací systém takového uspořádání by byl velmi náročný a neobešel by se bez určitého programu, ať již s nahodilým nebo postupným adresovým



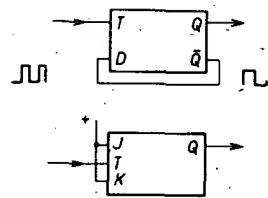
Obr. 30. Princip čtyřhlasého nástroje

Tab. 7. Vzájemným posuvem jednotlivých částí tabulky (A C nebo B C) je možno vyšetřovat aktivaci jednotlivých generátorů při tvorbě akordů v různých tóninách. (Naznačená poloha tabulky před rozstříháním odpovídá tónině C; označení křížkem znamená znějící tón)

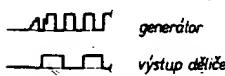
A	Příklad systému se čtyřmi generátory	Pořadí generátoru	I.	II.	III.	IV.	I.	II.	III.	IV.
		Příslušné tóny	C Cis D	Dis E F	Fis G As	A B H	C Cis D	Dis E F	Fis G As	A B H
B	Příklad systému se šesti generátory	Pořadí generátoru	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	I.	II.
		Příslušné tóny	C Cis	D Dis Es	E F	Fis G Ges	As A	B H	C Cis	D Dis
C	Obecná intervalová stavba některých vybraných akordů v oktálovém rozpetí	DUR	X		X		X		X	
		MOLL		X		X				
	DUR <sup>+</sup>		X		X		X		X	
	DIM		X		X		X		X	
	DUR <sup>6</sup>		X		X		X		X	
	DUR <sup>7</sup>		X		X		X		X	

akordy  $dur^8$  a  $dur^7$ . Jejich realizace čtyřhlasým nástrojem je závislá na poloze vodícího tónu. Například akord  $C^6$  zní správně – vodící tón C je generován prvním, tón E druhým, G třetím, A čtvrtým generátorem. Je-li vodícím tónem prostřední ze skupiny, odpovídající některému generátoru, je opět realizace akordu správná. Bude-li však vodícím tónem poslední z kterékoli skupiny, např. D, žádá se na čtvrtém generátoru, aby produkoval dva tóny, A a H, což je nemožné. Požadovaná sestava akordu  $D^6$  – D, Fis, A, H je nástrojem s prioritou vyššího tónu ochuzena na D–Fis–H. Tím je ovšem narušena potřebná intervalová sestava i durově sedmičky a rády jiných akordů. I když čtyřhlasé nástroje jsou ve srovnání s jednohlasými bezsporu kvalitnější, jsou přece jen značně primitivní, což pozná i neškolený hudebník po určité době používání, především při sólové hře. Přesto, že čtyřhlasé nástroje patří ve své kategorii k nejrozšířenějším, jsou jejich konstrukce často doprovázeny zmínkami o možnosti rozšíření počtu generátorů až na šest nebo sedm. Praktické realizace takových nástrojů sice však nevyskytuji. Proč? Podle mého názoru jsou základní příčinou problému se stabilou ladění jednotlivých nespojitých generátorů – se zvětšujícím se počtem generátorů se zvětšuje i stupeň jejich vzájemného rozladování a tím i riziko falešného zvuku nástroje. Předpokládejme však, že jsme schopni zajistit potřebnou stabilitu generátoru. Jaké výhody získáme rozšířením čtyřhlasého systému na sedi generátorový? Tímto způsobem, založeným na rozdělení oktávového intervalu do šesti skupin, můžeme zpracovat libovolnou akordovou sestavu, ježíž jednotlivé intervaly jsou větší jak půltónový krok. Použijeme-li stejně jako v předešlém případě tab. 7, tentokrát díly B a C, můžeme konstatovat, že všechny uvedené akordy znějí plně, opět pouze s výjimkou potlačení primy v oktávové sestavě. Stejně je tomu u ostatních čtyřhlasých akordů, nevyužívajících většího než oktávového rozpětí. Další významnou předností šestihlasého systému je podstatné rozšíření možností vázané hry, při níž je omezení půltónových intervalů v praxi téměř neznačné. Konečně, doplnili-li bychom systém ještě jedním, sedmým generátorem, bylo by odstraněno i omezení oktávového rozpětí. Tento krok však již považuji u běžného nástroje za zbytečný luxus. Naopak systém se šesti generátorů můžeme objektivně hodnotit jako perspektivní pro většinu amatérských konstrukcí vzhledem k jeho možnostem a především pro výrazně menší pořizovací náklady ve srovnání s polyfonním nástrojem.

Lepší varianty vícehlasých nástrojů jsou upravovány pro určitý způsob součinnosti levé a pravé ruky. Některá řešení skutečně výrazným způsobem rozšiřují zvukový prostor těchto nástrojů. Nejznámější jsou kombinace...



Obr. 31. Využití integrovaných děličů typu  $D + J-K$



Obr. 32. Idealizované potlačení kliksů kmítočtovým dělením

čovány pouze u vyšších stopových signálů. Menší výraznost kliků na nižších stopách vyplývá nejen z nižší kmitočtové polohy, ale také z toho, že značná část kliků výstupu generátoru neprojde na nižší stopy, at již z důvodu doby trvání něbo nedostatečné střmostí spouštěcí hrany nebo úrovni (viz obr. 32).

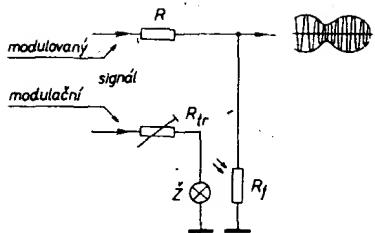
U vícechlasých nástrojů se také poprvé setkáváme s možností vázané hry – postupného, překrývaného navazování jednotlivých tónů bez toho, že by mezi nimi muselo docházet k neznajícím, byť krátkým intervalům, jako je tomu u jednochlasých nástrojů. U tohoto způsobu hry je kliks, vznikající s nasazením nebo ukončením jednoho ze dvou nebo skupiny dálé znajících tónů do značné míry maskován zvukovým obsahem zbyvajících tónů. Je-li nástroj opatřen dosta-tečně kvalitním ovládacím systémem a kvalitními generátory, nabízí se možnost potlačovat kliksy pouze na počátku nebo konci prvního nebo posledního tónu z celé vázané skupiny. Za uvedených předpokladů je možno dosáhnout dobrých výsledků i s jediným oddělovačem, zapojeným jako u jednochlasých nástrojů ve společné cestě výstupního signálu.

Předchozí řádky v žádném případě neměly za cíl zlehčovat problémy s kliksy – chtěl jsem pouze zdůraznit, že situace v vicechlasích nástrojů je také z tohoto hlediska pro výsledný hudební dojem příznivější.

Na obr. 30 si ještě povíšimme typického rysu vícehlásých nástrojů, s nímž se budeme dále setkávat také u nástrojů polyfonních a který přinese nejeden problém. Jednotlivé shodné stopové výšky všech generátorů jsou lineárně slučovány do společné stopy této výšky a teprve takto zaváděny do rejstříkových filtrů. Důvodem takového usporádání je princip registrové syntézy – aby bylo možno upravovat zvukové zabarvení v celém rozsahu manuálu, je třeba obsah a charakter stop společně výšky ovlivňovat jednotně, tedy společně.

## **Efekty a doplňky vícehlasých nástrojů**

Nejvýraznějším a nejčastějším efektem, užívaným u vícehlasých nástrojů, je opět vibrato. Některé lepší nástroje bývají doplněvány také tremolem, jehož princip jsme si již popsali. I když je vibrato univerzálnější než tremolo, je tremolo přesto velmi zajímavé. V některých rejsťkových polohách propůjčuje nástroji působivý „vznešený“ charakter. K jeho realizaci, tj. k amplitudové



Obr. 33. Tremolo se žárovkou a fotoodporom

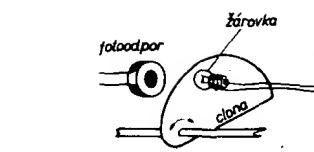
modulaci, se nejčastěji používá optoelektronická vazba (obr. 33). Jako budík se nejčastěji používá žárovka s malým příkonem, jejíž vlákno má v rozsahu modulačního kmitočtu (asi 5 až 12 Hz) již značnou tepelnou (a světelnou) setrvačnost. Pro zvětšení linearity mezi budíkem proudem a světelnou intenzitou má vlákno určitě stejnosměrné předpětí. Světelná setrvačnost žárovky je velmi vhodná pro potlačení rušivých signálů, jako jsou např. brumy. Proměnná intenzita světla, působícího na snímač, prvek (fotoodpor) působí diferenciální změny jeho odporu. Také fotoodpor má svoji setrvačnost, ve srovnání s žárovkou však mnohem menší. Tato setrvačnost se však uplatňuje pouze při buzení světelným signálem. Nelinearity fotoodporu může být do značné míry kompenzována již uvedeným s s předpětím žárovky vzhledem k maximální požadované hĺbce modulace signálu. Z hlediska elektrického vstupního signálu však můžeme fotoodpor považovat za zcela lineární a kmitočtově nezávislý prvek (v akustickém rozsahu). Pak je již činnost uspořádání na obr. 33 zcela jasná. Změnami světelné intenzity žárovky výkonově přizpůsobeným modulačním signálem, odebíraným např. z generátoru vibranta, mění se diferenciálně přenosový poměr napěťového dělícího, jehož jeden prvek je tvořen fotoodporem – tím se amplitudově moduluje v rytmu modulačního kmitočtu.

Při hodnocení tohoto způsobu amplitudové modulace jsem si všiml jedné zajímavé možnosti. Modulační signál pro vibrato i tremolo se obvykle odebírá ze stejného generátoru. Optimální kmitočty vibranta (6 až 7 Hz) a tremola (10 až 12 Hz) jsou však přibližně v poměru 1 : 2. Požadavek jednoduchosti často vede k užití pevného modulačního kmitočtu, obvykle optimálně nastaveného pro vibrato. Potom při užití samostatného tremola, nebo kombinace tremolo + vibrato nevyužíváme plně všech možností obou efektů. Optoelektronické vazby lze však využít současně také jako zdvojováče modulačního kmitočtu. Jediným požadavkem je, že modulační signál pro žárovku musí být obecně symetrický podle nulové napěťové osy a nesmí být podložen stejnosměrnou složkou. Jednotlivé fáze převodu modulačního kmitočtu na průběh modulační obálky ovládaného signálu jsou na obr. 34. Modulační signál

žárovky je znázorněn na obr. 34a. Kdyby vlákno nemělo setrvačnost, odpovidal by průběh kolísání okamžitému odporu fotoodporu (obr. 34b). Ve skutečnosti však ostře špičky, odpovídající zhasinání vlákna, jsou jeho setrvačností výrazně potlačeny. Potom se průběh odporu fotoodporu velmi blíží sinusovému s dvojnásobným opakovacím kmitočtem, jak je patrné i z modulační obálky na obr. 34c. Lineáritu modulační obálky je také možno ovlivňovat přidavnými kompenzačními prvky dělící, lineáritu modulace, která však není nutnou podmírkou, může být upravována i kompenzací průběhu modulačního proudu žárovky.

Principu optoelektronických měničů je možno využívat i při obvodovém řešení další řady efektů nebo ovládacích funkcí. Typickými příklady (u některých vícehlasých nástrojů) jsou aplikace v efektech perkus, sustain nebo regulátor dynamiky.

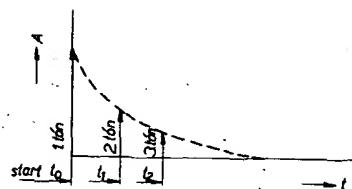
Pojmenem perkuse se obvykle označuje úderový charakter tónu, jako sustain bývá označováno pozvolné dozvívání tónu. Oba tyto efekty se u nástrojů s nespojitými generátory vyskytují pouze jako nepřesné obměny efektů klasických. U obou se využívá časově omezeného působení na přenosový poměr podobněho dělícího, jaký je znázorněn na obr. 33. Úpravy časového průběhu jednotlivých efektů je možno dosáhnout řadou způsobů, například vybíjení kondenzátorů různé kapacity přes žárovku. Tón zazní ostře, průběh dozvívání je ovlivněn především časovou konstantou obvodu. U popisovaných nástrojů je počátek efektu obvykle odvozován od spínací soustavy manuálu. Potom se efekt uplatňuje u každé klávesy plně pouze tehdy, nejsou-li jednotlivé tóny vázány. Při vázané hře jsou jednotlivé složky souzvuku ovlivňovány s časovým průběhem, startováním prvním ze skupin znějících tónů. Uvědomí-li si hudebník tento fakt (obr. 35), může



Obr. 36. Bezkontaktní regulátor dynamiky

nepostradatelným doplňkem každého nástroje. Je to logické, neboť umožňuje přizpůsobit akustický projev požadavkům skladby, a to velmi jednoduchým způsobem. Je s podivem, že u mnohých konstrukcí vůbec chybí. Nejbežnější a nejjednodušší řešením je vhodná úprava obyčejného potenciometru pro ovládání nohou. Hlavní nedostatkem bývá časté poškození odporné dráhy nadměrným používáním a s tím spojené „chrastění“ v hudebném signálu. Často se reguluje dynamika nepřímo – výkonovým reostatem je ovládán proud žárovkou, ke které je pro potlačení chrastění paralelně připojen filtrální kondenzátor. Takto ovládaná světelná intenzita trpí působí na snímač prvek, fotoodpor. Podobná komplikovaná řešení bývají zdůvodňována požadavkem širokého regulačního rozsahu.

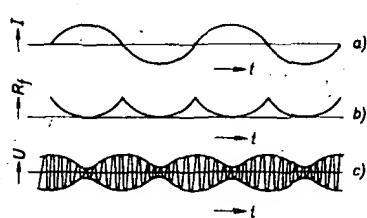
Podle mých zkušeností považuji za naprosto vyhovující rovněž princip optoelektronického regulátoru, avšak s bezkontaktní regulací. Intenzitu osvětlení fotoodporu v tomto případě neovlivňuje změna proudu žárovkou, ale postupné zaclánění světelného paprsku pohyblivou kulisou (obr. 36). Vhodným tvarem clony je možno snadno dosáhnout požadovaného průběhu regulace v závislosti na natočení clony. Samozřejmě, že celý systém musí být umístěn v dokonale tmavém prostoru. Dosažitelný regulační rozsah bez jakýchkoli zvláštních opatření je 30 až 40 dB. Regulace je absolutně čistá, bez jakýchkoli šelestů. Regulátor by však měl (vzhledem k co největšímu odstupu signálu od šumu a hluků) zpracovávat signál s co největší úrovní, měl by být zařazen tedy až před koncovým zesilovačem. Pak se ovšem někdy mohou projevit potíže s potřebným minimálním odporem fotoodporu, zvláště tehdy, chceme-li pedál odpojovat bez narušení funkce nástroje.



Obr. 35. Průběh dozvívání tónu a poměry při vázané hře

kombinacemi jednohlasé, vázané a blokové hry vytvářet zajímavé efekty v závislosti na průbězích modulační obálky. Vyavit po dobném systémem každý generátor není vhodné, protože při požadavku shodného časového průběhu tónů, vybíraných jak z jednoho, tak z více nezávislých generátorů, je třeba konstruovat složitý obvod (start-stop, časové průběhy aj.). To zvyšuje náklady neúměrně k kvalitativní skupině nástroje; naproti tomu původní řešení umožňuje prostou inverzí časového průběhu řídicího napětí ovlivňovat také charakter náběhu jednotlivých nebo prvního ze skupiny tónů. Vzhledem k tomu, že se opět uplatňuje maskování náběhu nebo dokončení tónu dle znějícími tóny, je to tento efekt, napodobující nástup dechových nástrojů, vhodným doplněním vícehlasého nástroje. Oba uvedené efekty jsou někdy řešeny tak, že jejich činnost není odvozena od klaviatury, ale může být samostatně ovládána ve zvoleném okamžiku samostatným ovládačem. Domnívám se, že toto řešení, i když je jednoduché, není vhodné a navíc může být částečně simulováno i ovládáním regulátoru dynamiky.

Tím jsme se vlastně dostali k problému plynulé regulace úrovně dynamiky nástroje. Tento prvek (pro snadné ovládání nejčastěji řešený jako pedál, ovládaný nohou) je podle mého názoru nejdůležitějším a prakticky



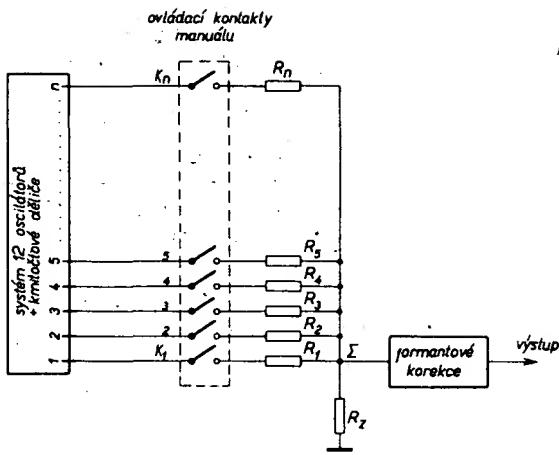
Obr. 34. K využití fotoodporu jako násobiče kmitočtu modulačního signálu

### Polyfonní (plnohlasé) nástroje

Některé konfigurace nástrojů z předchozí skupiny se svými vlastnostmi a možnostmi použití již blíží nástrojům polyfonním, které jsou lidově častěji nazývány „elektronické varhany“. Také tato třetí skupina zahrnuje kvalitativně široký obor nástrojů – od relativně jednoduchých – po několikanamálové „strojovny“ s bohatým vybavením a obvykle neméně bohatým příslušenstvím. Všechny polyfonní nástroje však mají jedno společné – po stisknutí každé klávesy je kdykoli a za jakýchkoli okolností systém schopen okamžitě generovat příslušný tón. Generátory (oskulátory) těchto nástrojů jsou, až na nepatrné výjimky, řešeny jako stabilní a nepřetržitě kmitající.

Jíž v kapitole o vícehlasých nástrojích jsme uvažovali systém, který by měl tolik základních generátorů, kolik je kláves na manuálu. Například čtyřoktávový nástroj by měl 48 generátorů a stejný počet dělících řetězců, aby bylo možno zpracovat jednotlivé tóny v rejstříkových obvodech. Toto řešení by ovšem bylo mimořádně drahé, prostorově a technicky náročné.

Většina polyfonních nástrojů užívá výhod temprovaného ladění, u kterého můžeme v každém případě považovat oktávový interval libovolného tónu rovný přesné poměru 2 : 1. To je samozřejmě užitečné, protože potom stačí pouze 12 základních generátorů



Obr. 37. Možný princip jednostopého nástroje

vybaven kaskádou děličů, jejichž počet  $n$  je možno určit jako

$$n = A + B - 2$$

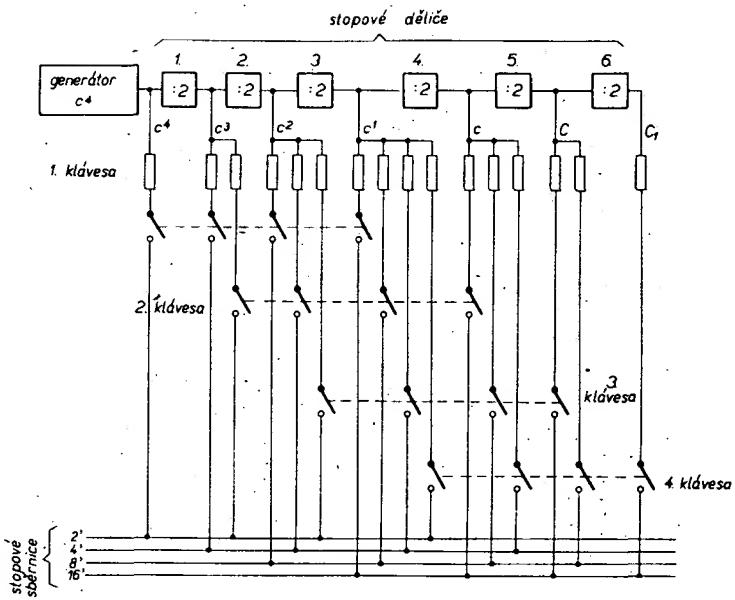
za předpokladu, že nejvyšší stopa je odebírána přímo ze základního generátoru, jak je obvyklé. V rovnici je  $A$  počet oktáv,  $B$  počet stop nástroje. Vidíme, že pro uvažovaný příklad potřebujeme šestistupňový dělič pro úplnou realizaci všech tónů stejného názvu, při zredukování počtu stop na tři musí mít kaskáda pět stupňů atd. Celkový potřebný počet děličů pro dříve uvažovaný případ je tedy  $12 \times 6 = 72$  kusů. Je to jistě výrazné omezení ve srovnání s jednoduchým spínacím systémem, přesto je však počet děličů

laděných na tóny nejvyšší oktavy. Signály, odpovídající všem nižším tónům, které v předchozím případě vytvářelo zbyvajících 36 generátorů, nahradíme prostým binárním dělením ve dvanácti větvích, kde vstupní signály tvorí jednotlivé tóny nejvyšší oktavy. Tento systém jsme si znázornili již dříve (obr. 28). Kdyby byl realizován nástroj jednostopý, pak bychom mohli jednotlivé požadované tóny vybírat jednoduchými klávesovými spínači (obr. 37). V symbolickém schématu na obr. 37 chybí ovšem obvody pro potlačení klíksů (ty zde vznikají jako důsledek náhodného ovládání kláves a zakmitávání kontaktů). Výsledný signál by tedy byl tvořen lineární směsi právě zúčastněných tónů. Stejně jednoduché ovládání by bylo možné použít tehdy, když bychom sice využívali předností uvedené kmitočtové ústředny, ale kdyby každá klávesa byla vybavena vlastním systémem děličů pro tvorbu příslušných stopových výšek (obr. 38). Potřebný počet děličích stupňů by v tomto případě dosahoval několika set.

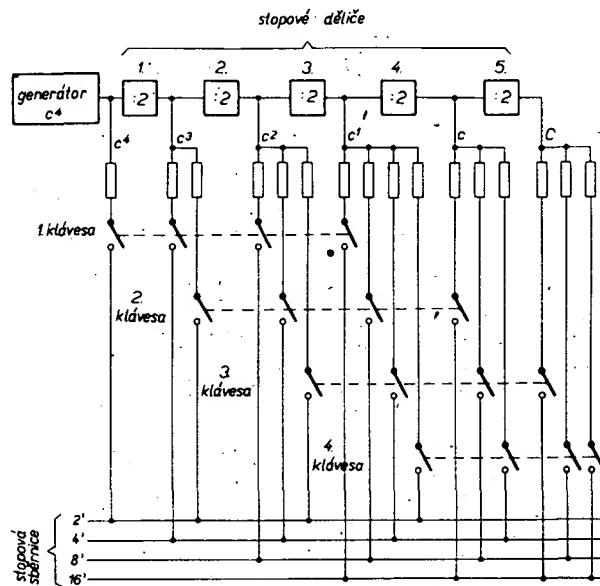
Pro ekonomické využití nesporných výhod systému se stabilními generátory (především velká stabilita, přefaditelnost, možnost sériové výroby a jiné) je však v každém případě nutno výrazně omezit potřebný počet stopových děličů. Problém je u téhoto nástrojů v zásadě řešen složitějším ovládacím systémem. Každá klávesa polyfonního nástroje je opatřena vícenásobnými oddělenými kontakty.

Princip činnosti při tomto úsporném ovládání tónů si znázorníme na jednom tónu v různých oktavách (například tónu C). Každá klávesa nástroje ovládá totiž páru spínacích kontaktů, kolik stop má nástroj. Předpokládejme, nástroj se čtyřmi stopami (obr. 39). Tento systém plně respektuje oktavový poměr jednotlivých zúčastněných stop – základní opakovací kmitočty jsou u každé klávesy v poměru 8 : 4 : 2 : 1. U nástroje s rozsahem čtyř oktav je tedy kombinace, počínaje nejvyšší klávesou c, uspořádání sítě následující –  $c^4 c^3 c^2 c^1 - c^3 c^2 c^1 - c^2 c^1 C - c^1 C C_1$ .

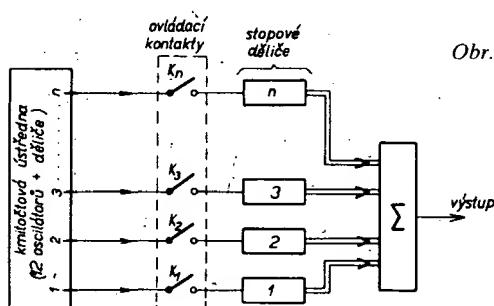
Z uvedeného výkladu pro jeden tón i z obr. 39 je zřejmé, že pro takto vytvářené signály stopových výšek musí být každý generátor



Obr. 39. Příklad úpravy mechanické sběrnice (je uvažován jeden tón ve čtyřech oktavách)

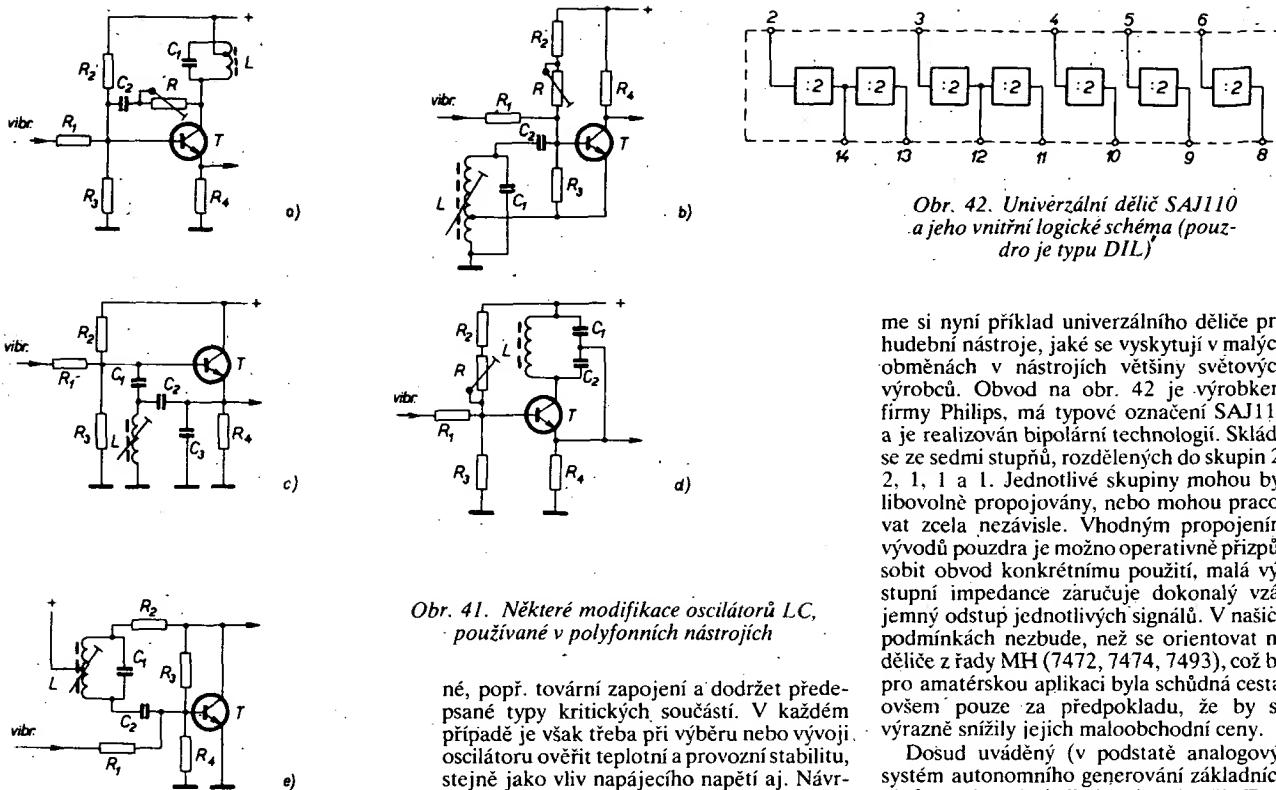


Obr. 40. Příklad z možných úsporných úprav (ve srovnání s obr. 39 je v řetězu každého generátoru ušetřen jeden děličí stupeň)



Obr. 38. Jednoduché ovládání nástroje se samostatným stopovým děličem každé klávesy.

stále značný. Proto se u většiny nástrojů šíří obsah některých oktav, zpravidla nejnižší (nebo i nejvyšší) o jednu stopu. Příklad takového řešení je na obr. 40. Zde je, ve



Obr. 41. Některé modifikace oscilátorů LC, používané v polyfonických nástrojích

srovnání se stejným případem na obr. 39, nahrazená nejnižší stopa 16' spodní klávesy stopou 8', takže nejnižší klávesa má nyní sestavu - c' cCC. Tímto způsobem je počet potřebných děličů redukován tak, že v každém řetězu odpadá jeden stupeň a počet děličů je tedy  $n = 60$ . I když je naznačené řešení jistě (vzhledem k charakteru a způsobu užívání okrajových tónů nástroje) přípustné, přesto je potřebný počet děličů stále značný. V posledních letech se proto zvláště u polyfonických nástrojů využívá stále větší měrou integrovaných obvodů, často speciálně konstruovaných pro tyto účely.

Vrátme se nyní k řešení základních generátorů polyfonických nástrojů. Jejich velkou předností je stabilní, ustálená činnost, umožňující aplikovat poměrně jednoduchá zapojení s velkou kmitočtovou stabilitou. Při návrhu generátoru musíme uvažovat především vliv teploty, vlnnosti, stabilitu mechanické konstrukce a použitých prvků, zvláště z hlediska dlouhodobého používání.

K dosažení potřebné stability se nejčastěji používají různé modifikace oscilátorů LC, astabilních multivibrátorů se stabilizací rezonančního kmitočtu obvodem  $LC$ , výjimečně i generátorů s ladičkami atd. U oscilátorů LC platí zásada, že stabilita je největší při harmonickém průběhu výstupního signálu, tedy při jeho minimálním zkreslení. Tomu odpovídá požadavek minimálního tlumení obvodu  $LC$ , volná vazba aktivního prvku. K dalším nejdůležitějším zásadám patří respektování vzájemné teplotní kompenzace cívky a kondenzátoru rezonančního obvodu. Dobrých výsledků, také vzhledem k dlouhodobé stabilitě, se dosahuje s práškovými hrnčíkovými jádry robustnějšího typu a terylenovými nebo polystyrenovými kondenzátory. Toto uspořádání také umožňuje snadno nastavit oscilační kmitočet dolaďovacím jádrem. Pro amatérské konstrukce se často používají i cívky na jádřech z transformátorových plechů. Zcela nevhodná jsou pro generátory jádra feritová, především pro výrazné a něvratné teplotní změny permeability. Při realizaci nástroje se doporučuje použít osvědče-

né, popř. tovární zapojení a dodržet předepsané typy kritických součástí. V každém případě je však třeba při výběru nebo vývoji oscilátoru ověřit teplotní a provozní stabilitu, stejně jako vliv napájecího napětí a j. Návratném generátoru se zabývá specializovaná literatura, na obr. 41 je pouze několik námětů řešení.

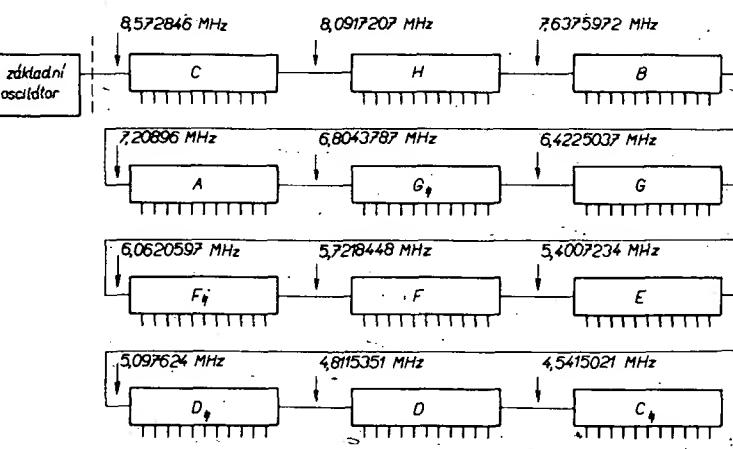
Se stále kmitajícím, vhodně teplotně kompenzovaným oscilátorem je možno dosáhnout dobré teplotní a dlouhodobé stability – seriózní firemní údaje uvádějí obvykle (pro běžné pracovní podmínky) stabilitu oscilátoru 0,1 až 0,2 %. Jedním z problémů, které se u oscilátorů  $LC$  vyskytují, je malá odolnost vůči rušivým polím. Proto bývají zpravidla buď celé oscilátory, nebo jejich cívky v stínících krychť. To je také, spolu s požadavkem efektivní výroby, předním kritériem a jednoduchosti kmitočtové modulace výstupního signálu důvodem, proč u některých nástrojů jsou i spojité generátory řešeny s astabilními, nejčastěji nesymetrickými multivibrátoři. Tímto způsobem je možné dosáhnout, i když poněkud obtížněji, využívající stability.

K vytváření kmitočtových normálů se tedy nejčastěji používá systém s dvanácti oscilátory a se soustavou kmitočtových děličů. To umožňuje vytvářet stopové kombinace s konstantním kmitočtovým poměrem jednotlivých stop libovolně klávesy. Pak je možno libovolně vybírat a kombinovat jednotlivé tóny bez jakýchkoli omezení, která nutně provázel předcházející řešení. Uved-

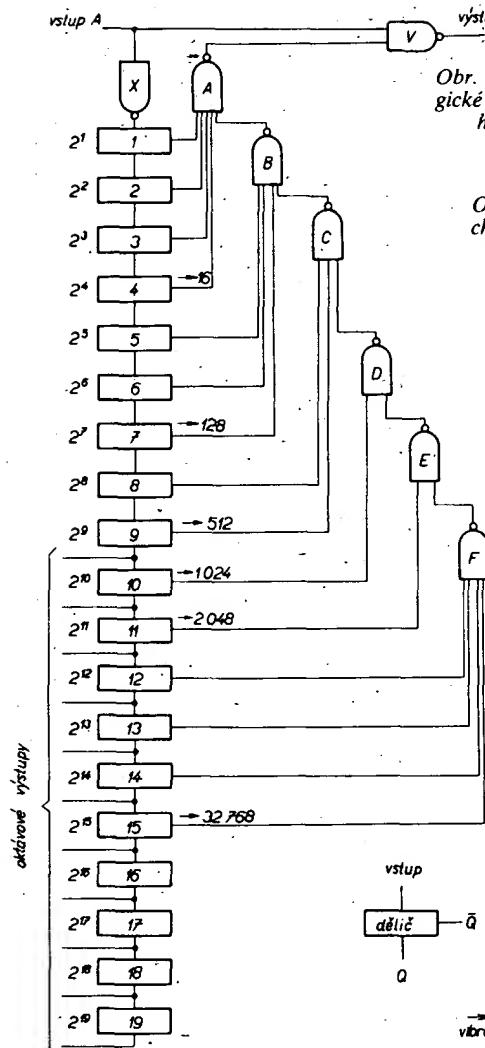
me si nyní příklad univerzálního děliče pro hudební nástroje, jaké se vyskytuji v malých obměnách v nástrojích většiny světových výrobců. Obvod na obr. 42 je výrobkem firmy Philips, má typové označení SAJ110 a je realizován bipolární technologií. Skládá se ze sedmi stupňů, rozdělených do skupin 2, 2, 1, 1 a 1. Jednotlivé skupiny mohou být libovolně propojovány, nebo mohou pracovat zcela nezávisle. Vhodným propojením vývodů pouzdra je možno operativně přizpůsobit obvod konkrétnímu použití, malá výstupní impedance zaručuje dokonalý vzájemný odstup jednotlivých signálů. Na našich podmínkách nezbude, než se orientovat na děliče z řady MH (7472, 7474, 7493), což by pro amatérskou aplikaci byla schůdná cesta, ovšem pouze za předpokladu, že by se výrazně snížily jejich maloobchodní ceny.

Došud uváděný (v podstatě analogový) systém autonomního generování základních tónů není však jediný ani nejlepší. Toto dlouhá léta bezkonkurenční řešení je v poslední době pomalu, ale jistě vytlačováno systémy digitálními, u nichž jsou všechny potřebné tóny oktaťového intervalu odvozovány z jediného signálu, z jediného generátoru. Využívá se číslicové techniky, jejíž přednosti je (při stabilním a přesném generátoru) stabilita výšky všech tónů. Američtí výrobci např. odvozují oktaťovou zpravidla z jednoho nebo dvou pouzder speciálních obvodů, základní kmitočet je kolem dvou MHz, často je stabilizován krystalem. Podle mého názoru ještě lepší a promyšlenější je prototypový systém Philips – úplný komplex všech tónů a stopových výšek, potřebných pro registrovou syntézu je digitálně vytvářen ve dvanácti pouzdrách speciálních integrovaných obvodů. Popisem tohoto systému jsem se zabýval poměrně podrobně v [19]. Proto si nyní povíšimeme pouze základního principu a možností použití.

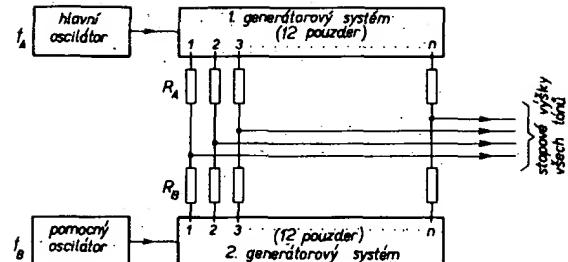
K vytvoření všech dvanácti tónů oktavy a v tomto případě současně i tónů všech oktav se využívá dvanácti zcela shodných integrovaných obvodů. Tyto obvody se zařazují do kaskády, jeden za druhým (obr. 43). Každý obvod má z tohoto hlediska jeden vstup a jeden výstup. První obvod kaskády je



Obr. 43. Blokové schéma systému, generující stupnici temperovaného ladění



Obr. 44. Vnitřní logické schéma jednoho pouzdra



Obr. 46. Tvorba chórusového efektu (f<sub>1</sub> je různý od f<sub>2</sub>)



zapojen na externí generátor opakovacího kmitočtu asi 8,57 MHz. Každý obvod vytváří budící signál pro následující obvod postupným „vypouštěním“ potřebného počtu impulů v definovaném cyklu; pro konečné vytvoření akustického výstupního signálu se používá jakási integrace na principu kaskády binárních děličů. Vnitřní činnost obvodu je tedy pevně programována tak, aby zajistila definovaný poměr počtu výstupních impulsů (svorka B) ke vstupním (svorka A). Tak je, vzhledem k charakteru temperovaného ladění, možno využít univerzálně jediného typu obvodu v celé síti. Funkční schéma vnitřní struktury jednoho pouzdra je na obr. 44. Výstupní signál se blokuje kombinační logikou, reagující na okamžitý stav kaskády vyrovnavacích děličů. Vynikajícím výsledkem je algoritmus systému, umožňující aplikovat jednoduché děliče typu 2<sup>n</sup> (kde n je celé číslo) bez kráčení početního cyklu. To umožňuje použít většinu děličů jak pro řízení logiky úpravy budicího signálu pro další stupeň, tak pro vytváření vlastního symetrického signálu a dělení oktávových stop. Analýzou činnosti vnitřní logiky se zabývat nebudeme, uvedeme si pouze její výsledek. Vyplývá ze srovnání ideálního půltónového kroku temperovaného ladění s algoritmem, užitým v logice každého obvodu: je možno stanovit kmitočtovou odchylku jednoho stupně  $\Delta f = 4,091 \cdot 10^{-6}$ . Uvážíme-li 12 půltónových kroků potřebných k dosažení oktávového intervalu, můžeme srovnání ideálního a realizovaného oktávového poměru stanovit celkovou, největší chybu systému, která je  $49,095 \cdot 10^{-4}$ . To znamená, že přesnost systému je prakticky neměřitelná servisními digitálními měřiči kmitočtu (v akustickém rozsahu). Stejně cenné je i to, že systém

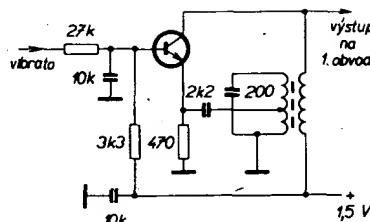
možnost jednoduše vytvářet chórusový efekt způsobem podle obr. 46; využívá se dvou popsaných systémů, z nichž jeden je mírně rozložen vůči prvnímu, hlavnímu, jehož tóny odpovídají přesnému ladění. Shodné tóny stejných stopových výsek obou generátorů jsou slučovány jednoduchou odporovou sítí, stupeň efektu lze snadno nastavit mírou vzájemného rozložení obou základních generátorů.

Informace o podobných systémech se jistě mnohým konstruktérům jeví jako krásná povídka, zvláště domýšleme-li jejich vliv na zjednodušení a kvalitu nástroje. Nám však nezbývá, než se znovu vrátit na zem.

Ze základního blokového schématu polyfonního nástroje na obr. 47 vidíme, že jednotlivé tóny se získávají shodně jako v předchozích případech. Princip činnosti je tedy opět jednoduchý, komplikace přináší především množství stále se opakujících obvodů. Již z předchozích náznaků o způsobu zpracování a slučování jednotlivých stop pro registrovou syntézu vyplývá, že se zde setkáváme s jedním konstrukčním prvkem, dosud u žádného nástroje nepoužitým. Je jím způsob výběru stopové kombinace, na blokovém schématu označený jako manipulační sběrnice. Z technologického hlediska se jedná o nejnáročnější díl polyfonního nástroje. Všimněme si proto možností, jak řešit sběrnici, poněkud podrobněji.

Jedinou možností, jak sloučit stopové výsky, je jejich lineární kompozice. V případě jednoho nebo vícehlasých nástrojů jsme s řešením tohoto požadavku neměli žádné problémy, protože byly vždy ovládány základní generátory a jejich stopové výstupy byly navzájem pevně kombinovány. U polyfonního nástroje se však musí tóny jednotlivých kombinací vybírat v zásadě podle obr. 39 nebo 40. Princip kombinací registrové syntézy a mechanické manipulační sběrnice byl poprvé uplatněn u nástroje Minshall a brzy se stal nejrozšířenějším především pro svoji účelnost a efektivnost. Při popisu výběru stopové kombinace naznačeným mechanickým způsobem jsme si všimli, že tato cesta výrazně nepotlačuje klísky ani neovlivňuje průběh modulační obálky. Dalšími nedostaty jsou problémy s dostatečným odstupem mezi různými signály, brumem, přeslechům, „hudebního“ šumu a především se spolehlivostí sběrniny.

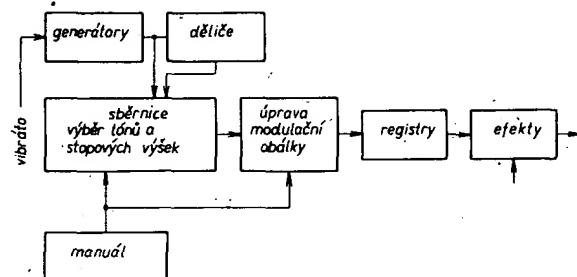
Mechanicky lze sběrnici v zásadě řešit dvěma způsoby, buď několikanásobným



Obr. 45. Základní vf generátor

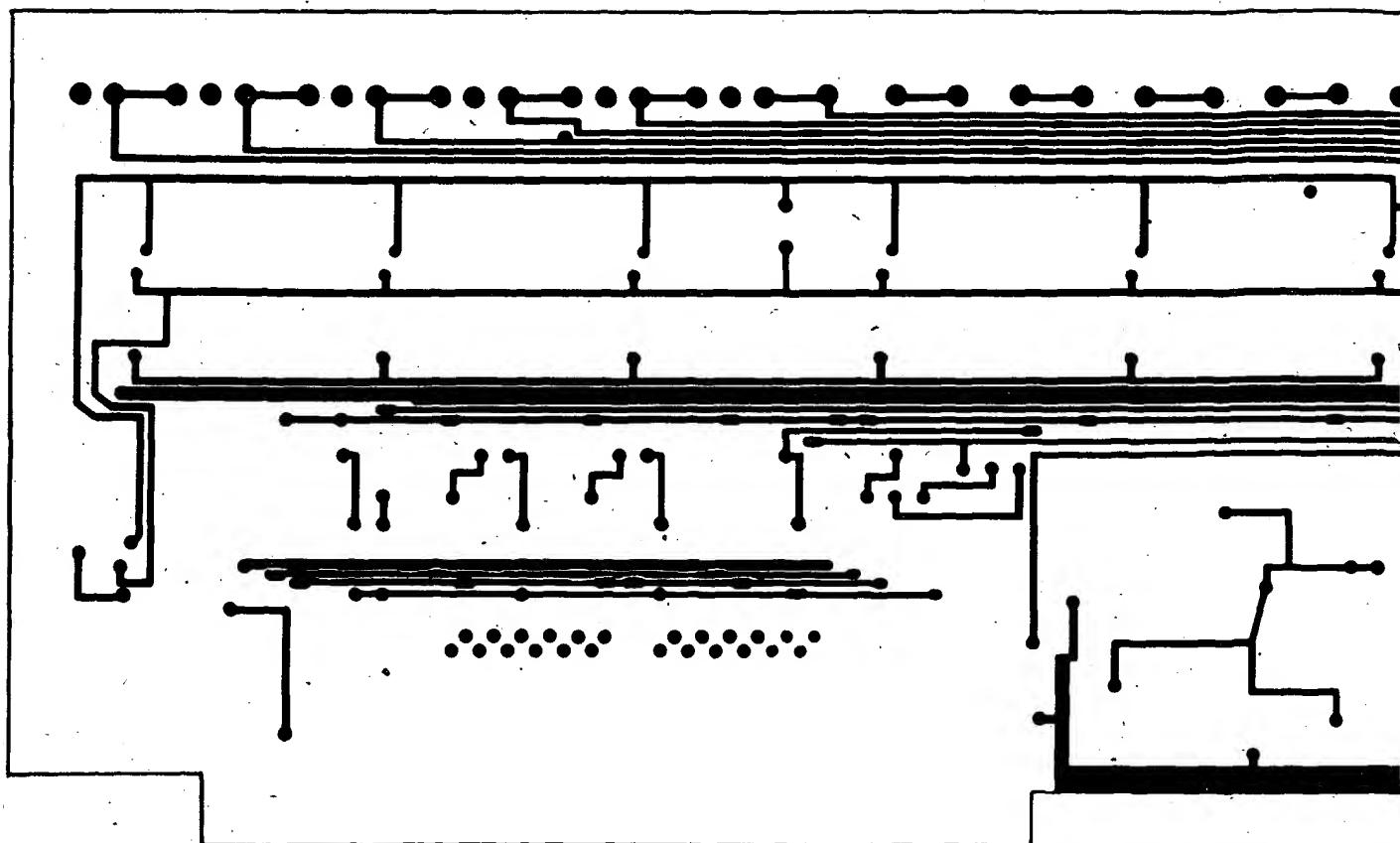
automaticky poskytuje všechny stopové výsky v celém slyšitelném akustickém rozsahu a zároveň další děliče není třeba používat.

Celý digitální systém je buzen z jednoduchého vf generátoru, příklad zapojení je na obr. 45. Pro zajímavost: udává se, že stabilita je lepší než 0,1 % při změně napájecího napětí v rozsahu 1,2 až 1,6 V nebo teploty v rozsahu 25 až 55 °C. Oscilátor a tím i výstupní signály všech pouzder je možno kmitočtově modulovat (vibrato). Přeladěním základního oscilátoru je možno snadno při-

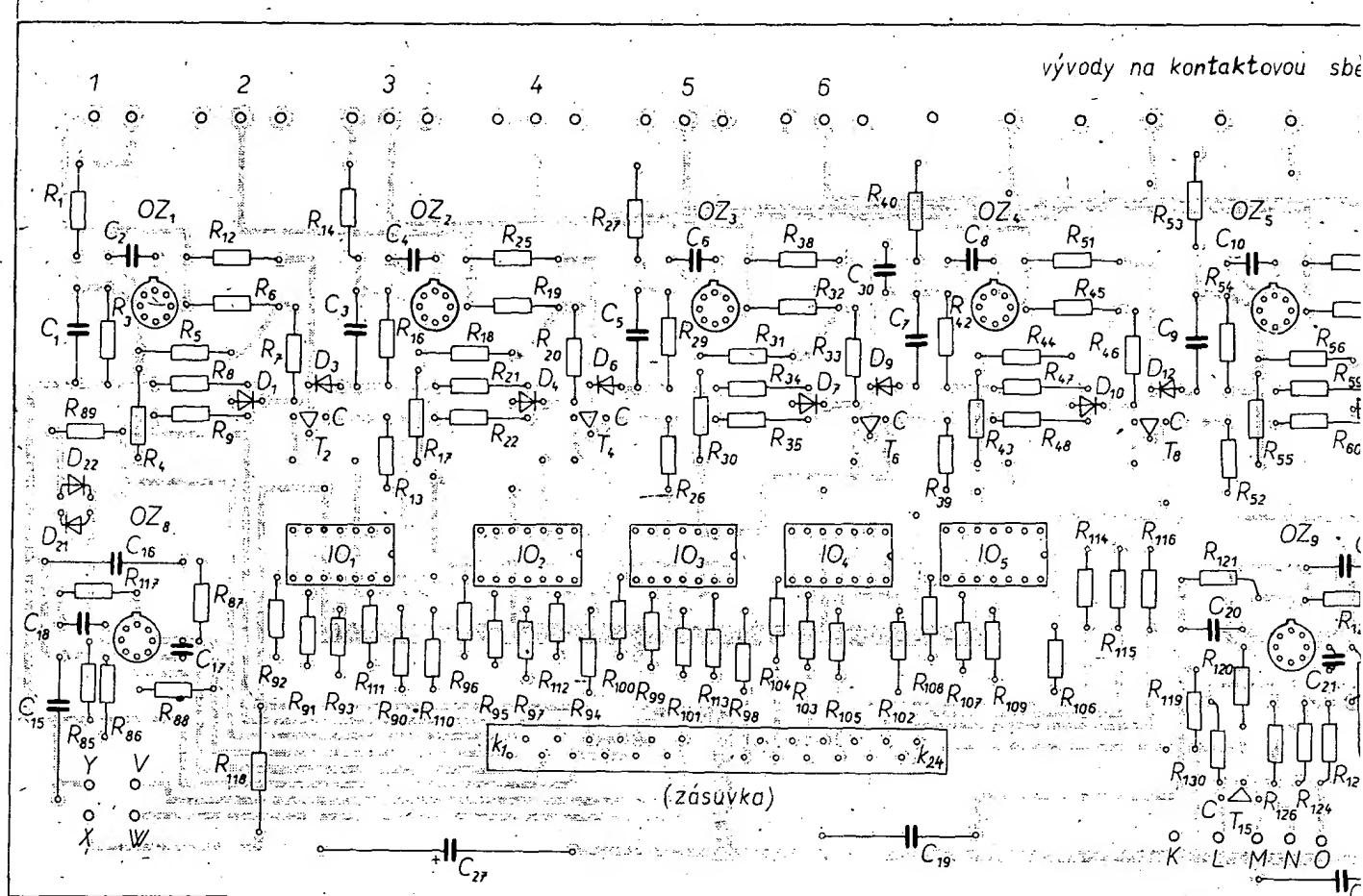


Obr. 47. Funkční schéma polyfonního nástroje

způsobit celý nástroj okamžitým požadavkům při přesném zachování jednotlivých poměrných tónových intervalů. Z rady dalších aplikací uvedeme nejzajímavější – mož-

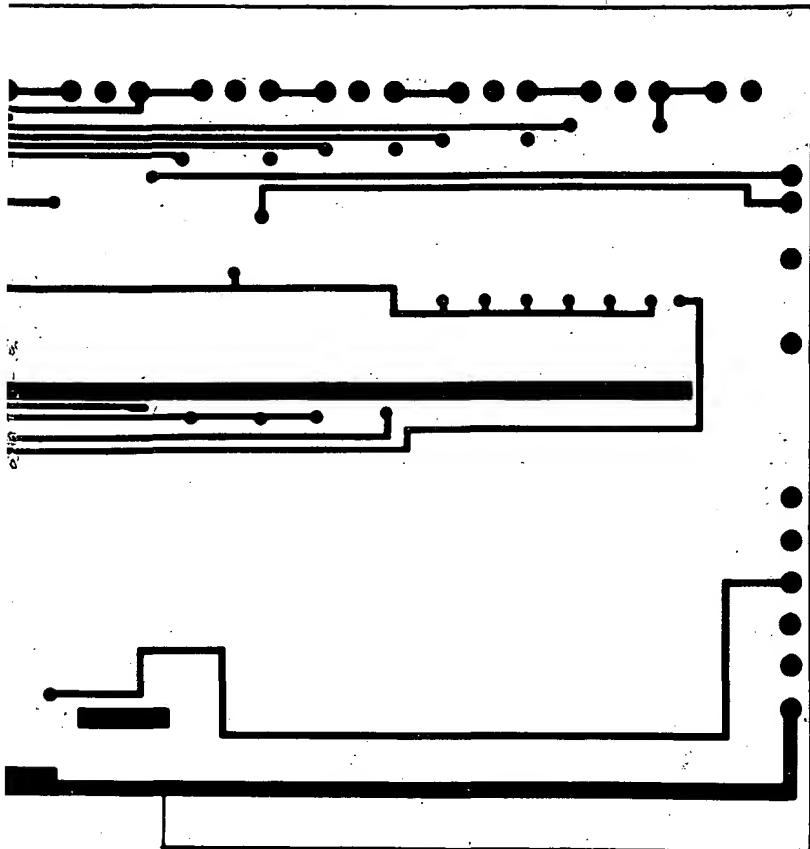


395



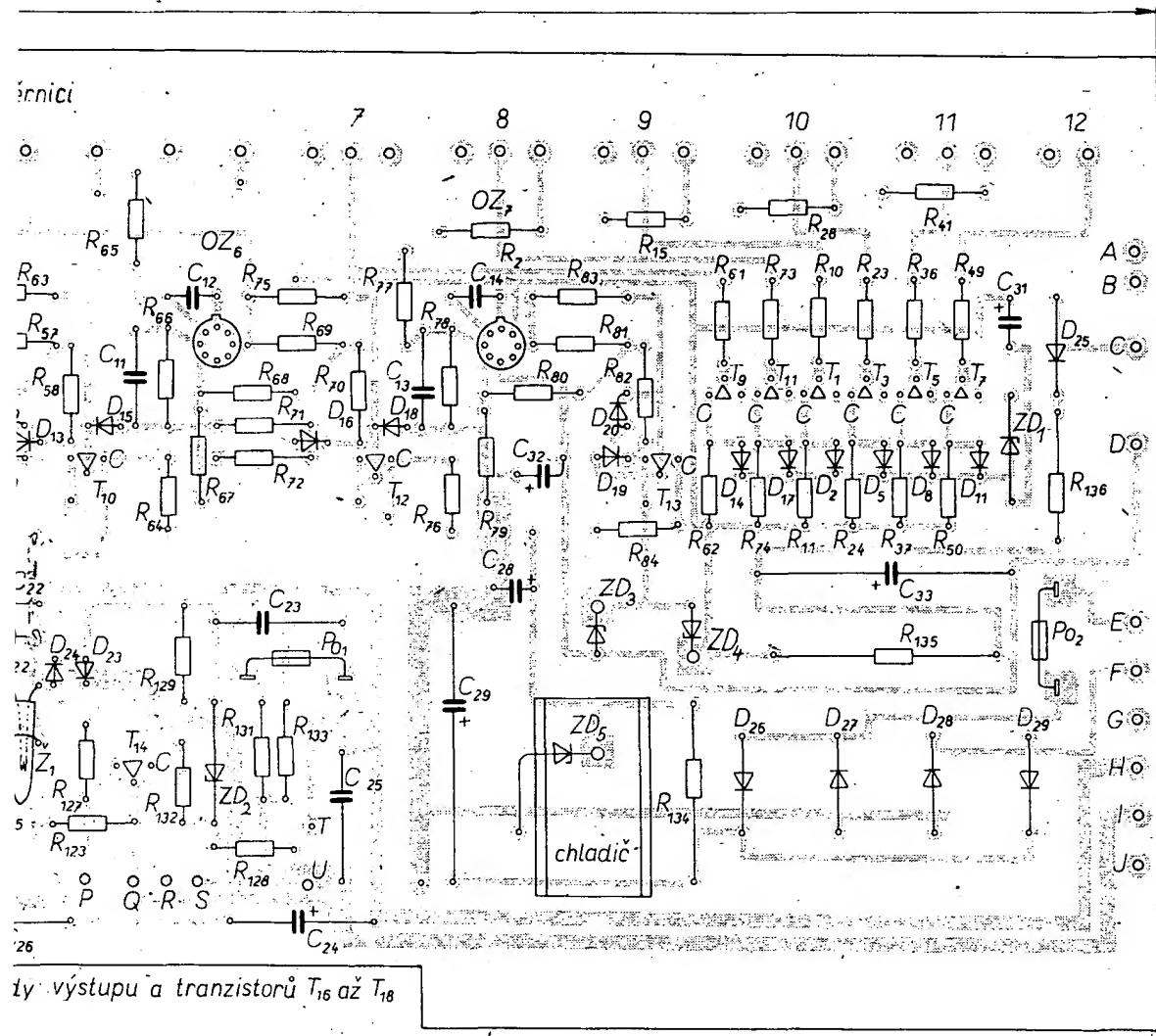
výřez pro přívody konektoru pedálu

výřez pro přívod



## Seznam součástek

$R_1$	82 k $\Omega$	$R_{18}$	22 k $\Omega$
$R_2$	0,18 M $\Omega$	$R_{19}$	8,2 k $\Omega$ , TR 112a
$R_3$	1 M $\Omega$	$R_{20}$	0,12 M $\Omega$
$R_4$	18 k $\Omega$	$R_{21}$	0,39 M $\Omega$
$R_5$	0,1 M $\Omega$	$R_{22}$	1 M $\Omega$
$R_6$	18 k $\Omega$	$R_{23}$	18 k $\Omega$
$R_7$	39 k $\Omega$	$R_{24}$	0,1 M $\Omega$
$R_8$	680 $\Omega$	$R_{25}$	18 k $\Omega$
$R_9$	5,6 k $\Omega$	$R_{26}$	39 k $\Omega$
$R_{10}$	27 k $\Omega$ , TR 112a	$R_{27}$	680 $\Omega$
$R_{11}$	12 k $\Omega$ , TR 112a	$R_{28}$	5,6 k $\Omega$
$R_{12}$	22 k $\Omega$	$R_{29}$	27 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{13}$	8,2 k $\Omega$ , TR 112a	$R_{30}$	12 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{14}$	0,1 M $\Omega$	$R_{31}$	22 k $\Omega$
$R_{15}$	0,18 M $\Omega$	$R_{32}$	8,2 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{16}$	1 M $\Omega$	$R_{33}$	0,15 M $\Omega$
$R_{17}$	18 k $\Omega$	$R_{34}$	1 M $\Omega$
$R_{18}$	0,1 M $\Omega$	$R_{35}$	18 k $\Omega$
$R_{19}$	18 k $\Omega$	$R_{36}$	0,1 M $\Omega$
$R_{20}$	39 k $\Omega$	$R_{37}$	18 k $\Omega$
$R_{21}$	680 $\Omega$	$R_{38}$	39 k $\Omega$
$R_{22}$	5,6 k $\Omega$	$R_{39}$	680 $\Omega$
$R_{23}$	27 k $\Omega$ , TR 112a	$R_{40}$	5,6 k $\Omega$
$R_{24}$	12 k $\Omega$ , TR 112a	$R_{41}$	27 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{25}$	22 k $\Omega$	$R_{42}$	12 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{26}$	8,2 k $\Omega$ , TR 112a	$R_{43}$	22 k $\Omega$
$R_{27}$	0,12 M $\Omega$	$R_{44}$	8,2 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{28}$	0,33 M $\Omega$	$R_{45}$	0,18 M $\Omega$
$R_{29}$	1 M $\Omega$	$R_{46}$	1 M $\Omega$
$R_{30}$	18 k $\Omega$	$R_{47}$	18 k $\Omega$
$R_{31}$	0,1 M $\Omega$	$R_{48}$	0,1 M $\Omega$
$R_{32}$	18 k $\Omega$	$R_{49}$	18 k $\Omega$
$R_{33}$	39 k $\Omega$	$R_{50}$	39 k $\Omega$
$R_{34}$	680 $\Omega$	$R_{51}$	680 $\Omega$
$R_{35}$	5,6 k $\Omega$	$R_{52}$	5,6 k $\Omega$
$R_{36}$	27 k $\Omega$ , TR 112a	$R_{53}$	27 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{37}$	12 k $\Omega$ , TR 112a	$R_{54}$	12 k $\Omega$ , TR 112a



ty výstupu a tranzistorů  $T_{16}$  až  $T_{18}$

$R_{15}$	22 k $\Omega$
$R_{16}$	8.2 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{17}$	82 k $\Omega$
$R_{18}$	1 M $\Omega$
$R_{19}$	18 k $\Omega$
$R_{20}$	0,1 M $\Omega$
$R_{21}$	18 k $\Omega$
$R_{22}$	39 k $\Omega$
$R_{23}$	22 k $\Omega$
$R_{24}$	8,2 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{25}$	82 k $\Omega$
$R_{26}$	0,1 M $\Omega$
$R_{27}$	0,1 M $\Omega$
$R_{28}$	0,22 M $\Omega$
$R_{29}$	82 k $\Omega$
$R_{30}$ až $R_{113}$	0,12 M $\Omega$ , TR 112a
$R_{14}$ až $R_{16}$	56 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{17}$	1,5 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{18}$	12 $\Omega$ , TR 144
$R_{19}$	47 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{20}$	18 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{21}$	1,5 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{22}$	0,22 M $\Omega$ , TR 112a
$R_{23}$	22 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{24}$	18 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{25}$	výběrový, TR 112a
$R_{26}$	15 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{27}$	680 $\Omega$
$R_{28}$	15 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{129}$	0,3 $\Omega$ , vinutý
$R_{30}$	680 $\Omega$
$R_{31}$	680 $\Omega$
$R_{32}$	5,6 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{33}$	18 $\Omega$ , TR 144
$R_{34}$	15 $\Omega$ , TR 507
$R_{35}$	150 $\Omega$ , TR 154
$R_{36}$	27 $\Omega$ , TR 144
$R_{37}$	4,7 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{38}$	4,7 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{39}$	56 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{40}$	56 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{41}$	33 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{42}$	1 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{43}$	2,2 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{44}$	2,2 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{45}$	0,1 M $\Omega$ , TR 112a
$R_{46}$	výběr, TR 112a
$R_{47}$	0,15 M $\Omega$ , TR 112a
$R_{48}$	10 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{49}$	22 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{50}$	47 $\Omega$ , TR 112a

$R_{151}$	680 $\Omega$ , TR 112a
$R_{152}$	0,18 M $\Omega$ , TR 112a
$R_{153}$	0,1 M $\Omega$ , TR 112a
$R_{154}$	39 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{155}$	3,3 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{156}$	3,3 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{157}$	47 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{158}$	3,3 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{159}$	0,1 M $\Omega$ , TR 112a
$R_{160}$ až $R_{166}$	5,6 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{167}$	100 $\Omega$
$R_{168}$	0,39 M $\Omega$ , TR 112a
$R_{169}$	68 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{170}$	56 k $\Omega$ , TR 112a
$R_{171}$	27 $\Omega$ , TR 112a
$R_{172}$	390 $\Omega$ , TR 112a
$R_{173}$	1,5 k $\Omega$ , TR 112a

Ladicí odpory melodické a basové části – výběrové kombinace  $R_a$ ,  $R_b$  (64 + 24 ks) TR 152, viz text

#### Kondenzátory

$C_1$ , $C_3$ , $C_5$ , $C_7$ , $C_9$ , $C_{11}$	10 nF (Remix)
$C_2$ , $C_4$ , $C_6$ , $C_8$ , $C_{10}$ , $C_{12}$ , $C_{14}$	39 pF, TC 210
$C_{13}$	47 nF, TC 235
$C_{15}$ , $C_{16}$	0,22 $\mu$ F, TC 180
$C_{17}$	220 pF, TC 210
$C_{18}$	10 nF, TK 750
$C_{19}$	1 $\mu$ F, TC 180
$C_{20}$	470 pF, TK 339
$C_{21}$	18 pF, TK 722
$C_{22}$	39 pF, TK 722
$C_{23}$	0,33 $\mu$ F, TC 180
$C_{24}$	100 $\mu$ F, TE 986
$C_{25}$ , $C_{26}$	0,15 $\mu$ F, TC 180
$C_{27}$	2000 $\mu$ F, TE 981
$C_{28}$	100 $\mu$ F, TE 003
$C_{29}$	1000 $\mu$ F, TE 984
$C_{30}$	0,1 $\mu$ F, TK 750
$C_{31}$ , $C_{32}$	20 $\mu$ F, TE 004
$C_{33}$	200 $\mu$ F, TE 988
$C_{34}$	1 $\mu$ F, TC 180
$C_{35}$	22 nF, TK 750
$C_{36}$	0,68 $\mu$ F, TC 180
$C_{37}$	20 $\mu$ F, TE 981
$C_{38}$ , $C_{39}$	50 $\mu$ F, TE 004
$C_{40}$	0,1 $\mu$ F, TC 180
$C_{41}$	50 $\mu$ F, TE 004
$C_{42}$	100 $\mu$ F, TE 981
$C_{43}$	22 nF, TC 235
$C_{44}$	47 nF, TK 750
$C_{45}$ , $C_{46}$	20 $\mu$ F, TE 005
$C_{47}$	20 $\mu$ F, TE 992
$C_{48}$	200 $\mu$ F, TE 988
$C_{49}$ , $C_{50}$	2200 $\mu$ F/35 V (TE 676)
$C_{51}$	15 nF, TC 235
$C_{52}$ , $C_{55}$ , $C_{56}$	33 nF, TC 182
$C_{53}$ , $C_{57}$	68 nF, TC 181
$C_{58}$	0,15 $\mu$ F, TC 180
$C_{59}$	47 nF, TC 181

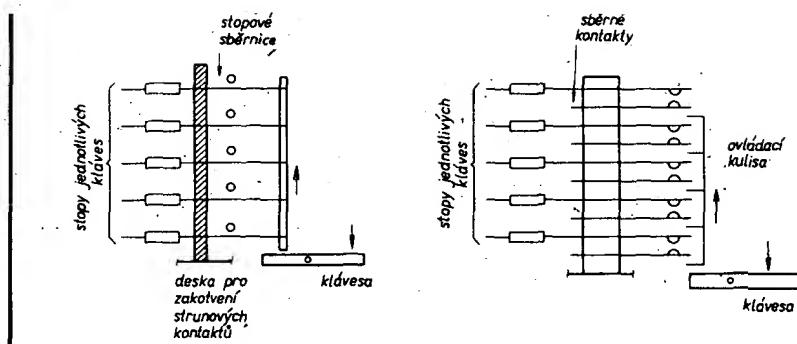
#### Polovodičové prvky

$OZ_1$ až $OZ_2$	MAA504 (MAA501, MAA502)
$IO_1$ až $IO_3$	MH7493
$IO_4$	MAA125 (MAA145)
$T_1$ až $T_{13}$	KC507 (KC147)
$T_{14}$	KF507
$T_{15}$	KF517
$T_{16}$	KC147
$T_{17}$ , $T_{18}$	KD601
$T_{19}$	KF520
$T_{20}$ až $T_{23}$	KC507 (KC147)
$D_1$ až $D_{24}$	KA501
$D_{25}$	KY705
$D_{26}$ až $D_{29}$	KY701
$D_{30}$ až $D_{33}$	KY708
$D_{34}$ , $D_{35}$	KY130/150
$ZD_1$ , $ZD_2$	KZ721
$ZD_3$ , $ZD_4$	výběr ze 6N70
$ZD_5$	výběr ze 1N70

#### Ostatní součástky

lahové potenciometry  $P_1$  až  $P_9$  10 k $\Omega$ /G, TP 601 jednoduchá tlačítka s aretací (Isostat)  $K_1$  až  $K_{17}$  propojovací konektor, vidlice WK 462 01, zásuvka WK 462 02

$Z_1$	12 V/50 mA
$Z_2$	20 V/100 mA (barevná, z vánočního stromku)
$P_{01}$	1,5 A $P_{03}$ , $P_{04}$
$P_{02}$	0,4 A $P_{05}$



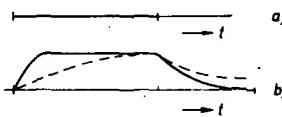
Obr. 48. Nejčastější řešení mechanické sběrnice

svazkem kontaktů (např. z relé), umístěným nad klávesou a ovládaným jejím zdvihem, nebo lze využít bodového doteku pružných drátových kontaktů, ovládaných rovněž pohybem klávesy, s tvrdě pokovenými, pevně nataženými strunami, tvořícími jednotlivé stopové sběrnice (obr. 48). Kliky lze částečně odstranit dolními propustmi, omezujícími spektrum rušivých jevů. Je to řešení sice levné, ale nedokonalé. Na druhé straně je třeba přiznat, že kliky jsou ve srovnání s vícehlasými nástroji méně výrazně vzhledem k jejich maskování v důsledku součinnosti pravé a levé ruky. Urovnění hluků a přeslechů se často omezuje zemněním přívodů „nehrájících signálů“ dalším kontaktem. Také některé užívané trikové efekty bývají obvykle ovládány prostřednictvím sběrnice. Velmi často je sběrná podélně dělená, což umožňuje buď vytvářat hlasitosti jednotlivých tónů v celém rozsahu manuálu, nebo naopak zvětšit hlasitost tónů, hraných levou rukou, či rozdílně zvukově zabarvit melodické a doprovodné části skladby atd. Těmito problémy se pro jejich jednoduchost zabýváme nebudeme.

Přes řadu uvedených nedostatků se mechanická sběrná dosud užívá nejčastěji, především proto, že umožňuje relativně levnou konstrukci polyfonního nástroje. Jako příklad uvedme systém, popsany v [15], kde autor dokázal realizovat 4 1/2 oktaový nástroj se třemi stopami s pouhými 74 tranzistory (bez úrovnového a výkonového zesilovače). Pronikavé omezení počtu aktivních prvků se u podobných konstrukcí dosahuje jednotranzistorovými děliči, které ovšem vyžadují minimálně stejný zástavbový prostor jako klasické, úspora ceny je přitom problematická a na rozdíl od klasických využívá nastavit děliči režim pro potřebný kmitočtový rozsah. Přesto se podobná řešení užívají i u profesionálních výrobků, příkladem může být nástroj Matador (NDR), který má rozsah 5 oktav a je osazen 80 tranzistory. První z uvedených konstrukcí užívá kmitočtově závislého děliče  $RC$ , druhá synchronizovaného blokovacího oscilátoru. Matador současně může posloužit jako příklad často užívaného způsobu ovládání časového průběhu obálky a do značného rozsahu i kliků u systému s mechanickou sběrnici, který je založen na možnosti ovládání dynamikou hraného tónu a tím i úrovně kliku velikostí tlaku prstu na klávesu. Ovládací kontakty jsou nejčastěji řešeny jako několik kluzných kontaktů, postupně dosedajících na odporovou snímací vrstvu. Princip činnosti takto upraveného kontaktu připomíná tedy do určité míry činnost potenciometru. Toto řešení bylo u řady firem dovedeno do značného stupně dokonalosti. Nástroje vybavené podobným ovládacím zařízením mohou být skutečně velmi kvalitní. Amáterská realizace takové sběrnice, má-li být dostatečně a dlouhodobě spolehlivá, však podle mého názoru, nemá v běžných podmírkách naději na úspěch. Toho si jsou velmi dobré vědomi i profesionální výrobci nástrojů vyšších tříd, kteří

usilují buď o bezkontaktní ovládání sběrnice, nebo ji řeší elektronicky.

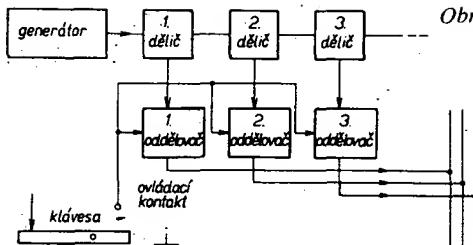
Můžeme snadno nahlédnout, že většina problémů, jimiž jsme se zabývali, by mohla být úplně odstraněna, kdyby se u nástroje používaly oddělovače kliksů. Pro čtyřoktaový čtyřstopý nástroj by to vyžadovalo 192 oddělovačů s odpovídajícím počtem součástí. U polyfonních nástrojů může být volbou časové konstanty oddělovače na rozdíl od jednohlasého systému ovlivněný časový průběh obálky v širokých mezích (obr. 49).



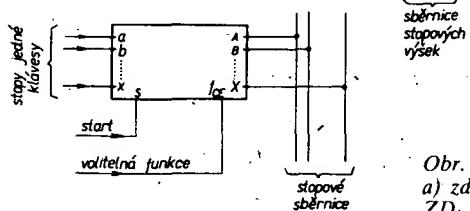
Obr. 49. Podmínky činnosti oddělovače u polyfonního nástroje: a) interval stisku klávesy, b) časový průběh modulační obálky při použití oddělovačů je vzhledem ke stále pracujícím generátorem teoreticky neomezený

U polyfonních nástrojů se kromě oktaových stopových výšek často ovlivňuje zvukové zabarvení i jinými stopovými složkami, ve srovnání se základní stopou cyklickými, které jsou ve vztahu k signálu v konsonantním poměru. Nejčastěji je užíván registr tertián (2 2/3') nebo kvinta (1 4/5'). Důvod, proč se tyto složky užívají především u polyfonních nástrojů, je zřejmý – u systému se stále pracujícími generátory jsou prostě kdykoli k dispozici. Např. tertií pro tón C tvorí E, kvintu G. U mechanické sběrnice stačí rozšířit počet kontaktů o další, u systému s oddělovači to znamená další zvětšení počtu oddělovačů. U některých nástrojů vybavených oddělovači se setkáváme se stejným prokenním ovládání mechaniky, jaké měla mechanická sběrnice, přesněji se stejným počtem ovládacích kontaktů. Jediným kladem tohoto řešení, nelehké na drobnosti, je to, že zde nejsou kladené zvláštní požadavky na jakost kontaktů (zakmitávání, přeslechy, ...). Uvážme-li však, že jednotlivé stopové jednoho tónu ovládám současně, je mnohem výhodnější z hlediska konstrukce ovládat všechny oddělovače jedné klávesy jediným kontaktem (obr. 50). Tomuto řešení se říká elektronická sběrnice.

Její hlavní přednosti je dobrý, navíc většinou volitelný časový průběh každého tónu, dokonalé potlačení kliksů a jednoduchá ovládací mechanika. Hlavním požadavkem, kladěným na oddělovač, je především co největší útlum v pasivním režimu. Uvědomíme-li si, že počet aktivních i ostatních součástí potřebný k realizaci elektronické sběrnice představuje (podle vlastností nástroje) asi polovinu až dvě třetiny počtu součástek celého zařízení, je rázem zřejmé, že toto řešení je možno pro běžnou amatérskou stavbu doporučit pouze s velkými výhradami. V každém případě je nutno se zaměřit vedle



Obr. 50. Princip elektronické sběrnice



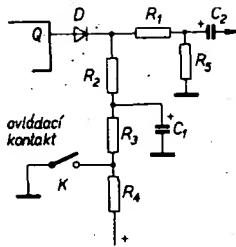
Obr. 51. Předpoklad možné integrace jednotlivých prvků elektronické sběrnice

kvalitativních parametrů také na ekonomiku stránku a na minimalizaci počtu součástí pro jednotlivé stopy.

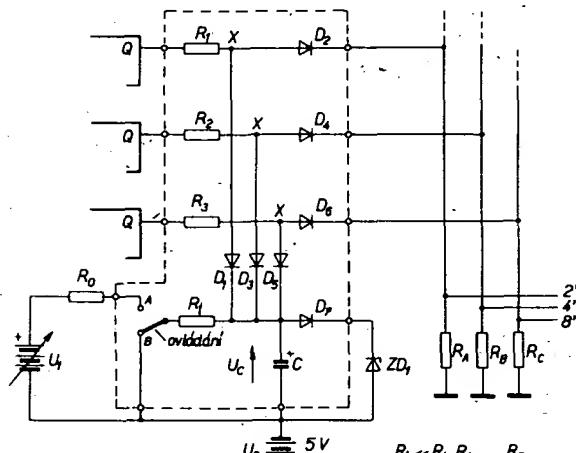
Domnívám se, že se musí vyrábět jednoúčelové integrované obvody, které by umožňovaly přenos digitálních vstupních signálů  $a, b, \dots, x$  na stopové výstupy  $A, B, \dots, X$  s časovým modulačním průběhem, startovaným signálem  $S$  a ovládaným jedním nebo více signály  $f_{CE}$ , ať již úrovnou nebo kódovou cestou (obr. 51). Ověřil jsem si, že jednoduchému řešení s využitím obvodu s otevřeným kolektorem, regulací jejich napájecího napětí atd. skutečně nestojí nic v cestě. Bohužel se mi žádné informace o podobných prvcích objevit nepodařilo. Vzhledem k charakteru stopových signálů (pravoúhlý průběh) nemusí být přenosová charakteristika oddělovače lineární – to je základním zjednodušujícím předpokladem pro všechna efektivní řešení.

Známé úpravy oddělovačů, využívající ovládaných diod nebo tranzistorů (obr. 52) jsou charakteristické bud nevhodujícím rozsahem regulace (přeslechy), nebo relativně velkým počtem rozměrnějších součástí, jako jsou elektrolytické kondenzátory apod.

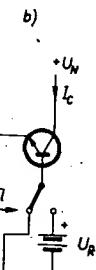
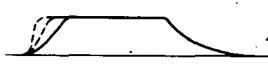
Pokud jde o diody, doporučoval bych vždy pouze křemíkové, s malou kapacitou přechodu, navíc využít ve dvoufázovém režimu, kdy jedna z diod posouvá úroveň napětí pro otevření nebo zavření hlavní regulační diody a navíc svým minimálním dynamickým odporem v propustném směru omezuje úroveň možných přeslechů oddělovače v pasivním režimu. Schéma ověřeného zapojení je na obr. 53. Při kontaktu přiloženém na svorku  $B$  je stupeň pasivní, dioda  $D_1$  je otevřena, dioda záporného napětí  $U_2$  je společně pro celý nástroj, je v  $X$  záporné napětí přibližně  $-5$  V, dioda  $D_2$  je tedy bezpečně uzavřena. Současně je v bodu  $X$  činností  $D_1$  v propustném režimu omezena úroveň impulsního napětí k příslušnému děliči na desítky mV. Díky tomu je při zavření  $D_2$  zcela omezen vliv přeslechové kapacity (inverzně polarizovaného přechodu). Přeložením ovládajícího kontaktu do polohy  $A$  se kondenzátor  $C$  nabíjí s časovou konstantou  $R_C C$ . Nabíjením kondenzátoru se zvolna zavírá  $D_1$  a signál prochází na stopovou sběrnici. Napětí  $U_C$  je omezeno na úroveň napětí společného referenčního bodu, definovaného stabilizační diodou  $ZD_1$ . Při uvolnění klávesy se kondenzátor vybije, ale vždy z konstantní napěťové úrovni. Naproti tomu nabíjení je možno ovládat pomocným napětím a tím ovlivňovat časový průběh náběhu tónu. Přitom obvod, určující časové konstanty, je pro všechny stopy klávesy jediný. Další výhodou



Obr. 52. Některé z nevhodných úprav oddělovačů



Obr. 53. Diodová sběrnice;  
a) zdroje  $U_1$  a  $U_2$  a dioda  $ZD_1$  jsou společné pro celý nástroj, b) regulaci zdroje  $U_1$  je možno upravovat tónové náběhy

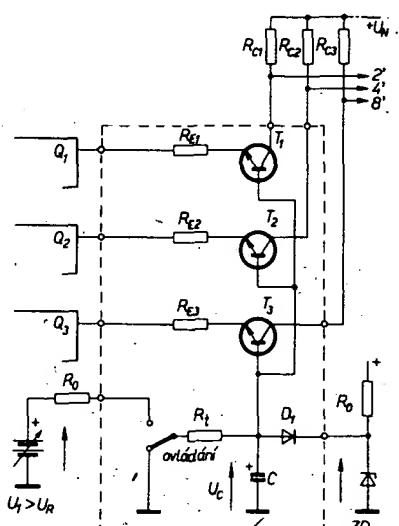


je to, že při ovládání tónu nevznikají přechodové jevy, které často provázejí podobné konstrukce a které je nutno dodatečně potlačovat řadou vazebních kondenzátorů (nehledě k lepším dynamickým vlastnostem). Toto řešení vyžaduje pro každou stopu jeden odpor a dvě diody, nebo přesněji, pro jednu klávesu se třemi stopami sedm diod, čtyři odpory a elektrolytický kondenzátor (obr. 53).

Kvalitní zapojení by bylo možno realizovat také s invertory s otevřeným kolektorem, ovládanými v kolektorovém obvodu. Bohužel, k zavírání výstupního tranzistoru v pasivním režimu vzhledem k trvalému připojení na stopovou sběrnici bylo nutno použít oddělovači diody, což je již nevhodné.

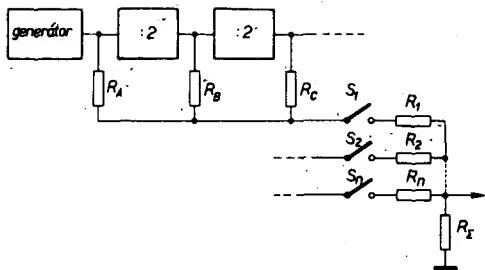
Zajímavá jsou řešení oddělovačů s tranzistory, pracujícími ve funkci řízeného proudového zdroje. Princip činnosti je na obr. 54. V pasivním režimu je tranzistor uzavřen nulovým napětím báze. Po stisku klávesy teče tranzistorem proud, úměrný

Obr. 54. Aktivizace proudového zdroje impulsy na výstupu  $Q$  děliče

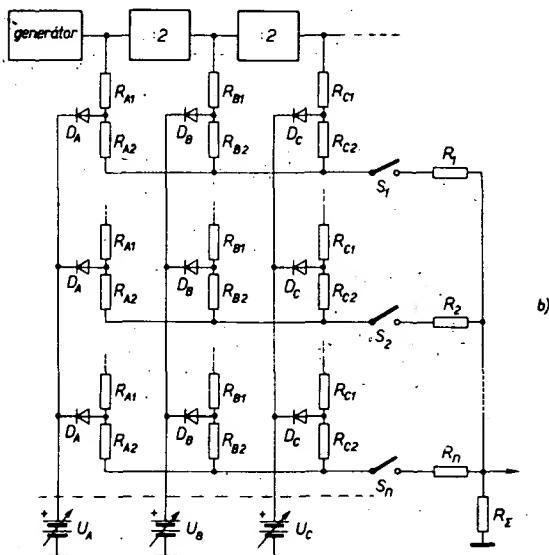


za předpokladu, že  $U_N > U_R > U_Q$ . Je-li na výstupu  $Q$  log. 1, je tranzistor zavřen (přechod báze-emitor je polarizován v závěrném směru). Proud oddělovačem tranzistorem protéká pouze tehdy, je-li na výstupu  $Q$  log. 0. Příklad zapojení oddělovače pro jednu klávesu je na obr. 55. Výhodou těchto oddělovačů je kromě jiného také to, že umožňují vyloučit slučovací odpory, neboť se slučují proudy stop jednotlivých kláves, převáděné na napěťovou úroveň jediným odporem, společným pro kolektory tranzistorů stejných stopových výsek celé sběrnice nebo její žádané části. Potom musí být  $R_C \ll R_E$ , aby při větším počtu aktivovaných tónů pracovaly všechny proudové zdroje v lineárním režimu. Každá stopa tedy vyžaduje jeden tranzistor a jeden odpor. Náběh tónu opět může být regulován podobně jako v předchozím případě. Velmi podobná sběrnice je

Obr. 55. Tranzistorová sběrnice



Obr. 56. K rozboru zjednodušené sběrnice; a) ovládání vícestopého signálu jednoduchými kontakty, b) použití diodových omezovačů (úpravou napěťových úrovní  $U_A$ ,  $U_B$  a  $U_C$  lze ovládat signály jednotlivých stop) -

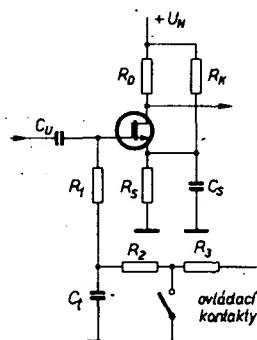


použita v [16], kde je popsána podle mých vědomostí, první amatérská konstrukce tohoto druhu u nás. V každém případě je elektronická sběrnice vhodná pro amatérskou stavbu kvalitních, ale také poměrně nákladných nástrojů.

Dosavadní výklad vyznívá poněkud pesimisticky, protože jen málo čtenářů může realizovat složitou mechaniku nebo investovat mnoho peněz do elektronické sběrnice. Lze tedy nějak jednoduše reálnizovat levnou a technologicky náročnou sběrnici, která by se vyrovnala činnosti komerčním výrobkům? Dospěl jsem k závěru, že takové řešení, za cenu určitého omezení palety zvukových zabarvení, existuje. Jaký je jeho princip? V úvodu této kapitoly jsme si všimli a znázornili (obr. 37) možnosti lineární kombinace jednostopých signálů s výběrem jednoduchými spínacími; důsledkem tohoto řešení je však

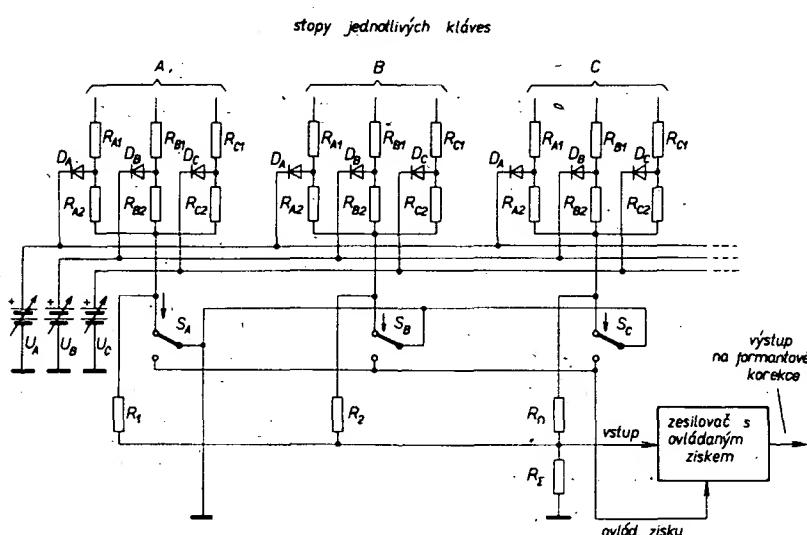
fádní a nezajímavé zvukové zabarvení. Kdybychom však zvolili určitý stupeň zvukového zabarvení, určený konkrétním poměrem jednotlivých stop, mohly by se stopy každé klávesy samostatně směšovat pevnou odpovovou sítí a komplexní signál by bylo možno ovládat stejným způsobem, jako v uvedeném případě na obr. 56a. Ani taková úprava by nás však trvale neuspokojila. Pro variabilní akustické zabarvení je třeba nějakým (především levným) způsobem ovlivňovat poměr signálů jednotlivých stop, protože další korekce je v tomto případě možno dělat pouze kmitočtovou filtrací nebo formantovými filtry v kanálu komplexního signálu. Poměr stop je možno upravovat jednoduchými amplitudovými omezovači, nejlépe podle obr. 56b, ať iž ovládáním všech stop nebo cestou vyuvažování k pevné, např. střední stopě. Výstupní signál každé klávesy lze v zásadě

ovládat jak spínacími, tak rozpinacími kontakty. Úprava však žádným způsobem nepotlačuje kliksy – omezovat je dolními propustami v účinném rozsahu je v tomto případě nevhodné již vzhledem k tomu, že v rozsahu několika oktav by byly různě ovlivňovány i příslušné signály stop a nebylo by možno vyrównávat hlasitost a zvukový charakter nástroje v širším rozsahu. Naznačené řešení je tedy jednoduché a levné, avšak (stejně jako mechanická sběrnice) nepotlačuje kliksy. Uvedli jsme již, že výraznost kliksů je u polyfonických nástrojů značně maskována technikou hry. K dosažení minimálně stejných výsledků jako s mechanickou sběrnicí by stačilo při kvalitních bodových kontaktech (jakými jsou například pružiny s kontakty z reléových svazků) potlačovat kliksy pouze na počátku a konci intervalu vázaných tónů, nebo pro každý jednotlivý tón, tedy podobně jako u jednohlasých nebo vícehlasých nástrojů. Možné řešení takto zjednodušené sběrnice je na obr. 57. K ovládání každé klávesy stačí použít jeden přepínačí kontakt. V klidové poloze kláves se zkratují výstupy signálů jednotlivých tónů, čímž se zamezuje přeslechy a jiné rušivé signály. Výstupní signál aktivovaných tónů je pak lineárně sloučován do komplexního výstupu na zatěžovacím odporu. Po stisknutí první klávesy se na tomto odporu okamžitě objeví signál žádané-



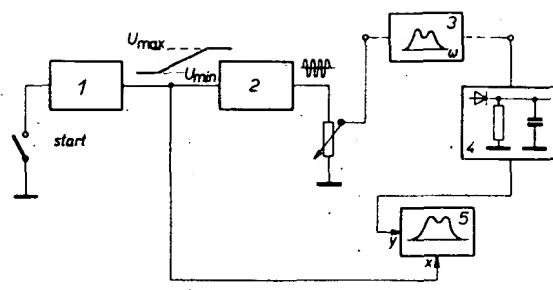
Obr. 58. Oddělovač kliksů pro zjednodušenou sběrnici

ho tónu, doprovázený kliksy, současně je s určitým zpožděním, určeným dobou překlopení kontaktu do polohy B získávan „start“ k aktivizaci oddělovače. Při uvolnění klávesy se signál „stop“ naopak získává s předstihem před vymízením signálu tónu na zatěžovacím odporu. Musíme si uvědomit, že dynamický rozsah polyfonických nástrojů je ještě větší než vícehlasých! V obou případech (při jediném oddělovači) zpracováváme komplexní signál, který je ve srovnání se stopovými průběhy mnohem náročnější na velikost nelineárního zkreslení, k němuž dochází při jednoduchém ovládání zisku (například při řízení kolektrového napětí nebo proudu běžných tranzistorových zesilovačů). Zkreslení se projevuje výrazně rušivě nejen v ustáleném režimu, ale i při přechodu oddělovače z pasivní do aktivní oblasti a naopak! Proto je žádoucí v těchto případech použít jakostní, lineární zesilovač s širokým rozsahem regulace zisku. Velmi jednoduše lze problém řešit aplikací tranzistoru FET, zapojeného jako zesilovač s napěťově řízeným ziskem, u něhož je zisk stupně úměrný napětí na elektrodách gate – source (řídící elektroda – emitor), obr. 58. Principu zapojení využívá i úprava pro potlačení kliksů na obr. 57, klidová poloha všech kláves posouvá režim tranzistoru do oblasti zániku proudu kanálu. Se stiskem první klávesy přechází tranzistor FET s časovou konstantou ovládacího obvodu do ustáleného pracovního režimu a naopak. Přechody jsou doprovázeny plynulými změnami zisku



Obr. 57. Zjednodušená úprava sběrnice ( $S_A$ ,  $S_B$ ,  $S_C$  – ovládací kontakty).

Obr. 59. Náčrt k řešení nf rozmitáče (1 - zdroj napětí pilovitého průběhu, 2 - převodník  $U/f$ , 3 - měřený obvod, 4 - detektor, 5 - zapisovač)



oddělovače kliksů. Takové řešení považují v naznačených souvislostech za nejvhodnější amatérskou úpravu sběrnice. Protože v tomto případě není možno působit jednoduše na spektrální obsah jednotlivých stop, je účelné rozdělit manuál (sběrnici) na dvě části (pro pravou a levou ruku). Tím vznikají z hlediska zpracování signálu dvě samostatné jednotky, každá s rozsahem 2 až 2 1/2 okáty, u nichž je již možno regulaci signálů stop a selektivní, formantovou úpravou obou komplexních signálů dosáhnout potřebného rozsahu zvukových zabarvení. To je ostatně vhodné i k nastavení dynamických poměrů při hře pravou a levou rukou, např. balančními potenciometry. V uvedené úpravě (avšak i v jiných případech) je užitečné měřit automaticky přenosové charakteristiky formantových obvodů, což přispívá k zjednodušení vývojových prací. Jako náčrt možného řešení je na obr. 59 ideové schéma nf rozmitáče se zapisovačem. Ústředními prvky jsou převodník  $U/f$  se sinusovým výstupem a součinnový zapisovač. Řídící napětí pro rozmitání a pro posuv zapisovače ve směru osy  $x$  je nutno získat ze zdroje napětí pilovitého průběhu s nastavitelnou výstupní úrovní. Výstupní signál převodníku po impedanční úpravě se vede na regulátor úrovně a z něj na měřený kmitočtový závislý korekční článek. Jednoduchý detektor musí mít velký vstupní odpor a časovou konstantu  $\tau \gg 1/f_{\min}$ . Po odstartování spínačem „start“ můžeme během několika desítek sekund získat graficky záznam přenosové charakteristiky.

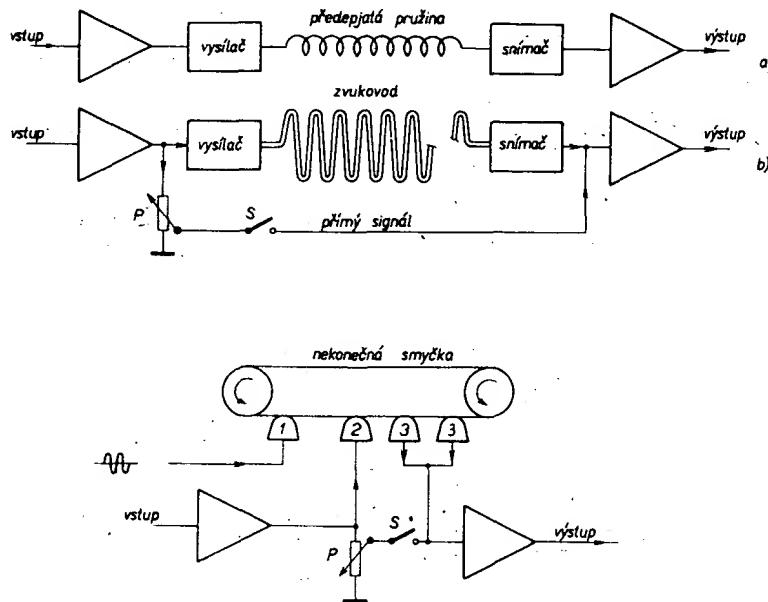
Dalšími obvody polyfonických nástrojů jsme se prakticky (v jiných souvislostech) již zabývali. Typickými efekty jsou opět vibráto, tremolo, výjimečně chorus, glizando, nebo již zmíněná variace na časový průběh modulační obálky, které jsou ovšem vzhledem k trvale pracujícím generátorům výrazně pestřejší a účinnější. Zvláštní význam u polyfonických nástrojů mají doplňky, umožňující vytvářet další, speciální efekty. Těchto složitých, často víceúčelových systémů, jejichž cena je obvykle srovnatelná s cenou vlastního nástroje, si ještě povídáme.

#### Doplňky a perspektivy polyfonních nástrojů

Konfrontujeme-li popsané způsoby elektronického vytváření komplexního signálu s požadavky přesně vystihnut zvukový charakter určitého akustického zdroje (viz úvodní kapitoly), musíme konstatovat, že vždy ten či onen systém teoretické možnosti značně omezuje. Je to logické, při praktické realizaci je vždy jedním z nejdůležitějších kritérií efektivnost a spolehlivost řešení. Nástroje, které jsme dosud uvažovali, mají výrazně omezen časový průběh jak modulační obálky, tak zvukového zabarvení. Oba parametry jsou buď časově neměnné, nebo jsou definovány pouze velmi jednoduchými, na realizaci nenáročnými časovými funkcemi.

Aby byly tyto nedostatky potlačeny nebo odstraněny, v současné době se aplikují v nástrojích již zmíněná doplňková zařízení nebo se konstruují nástroje nové, jinak řešené, které tyto nedostatky nemají.

Nejznámějším z řady dalších efektů je systém Leslie, který svého času natolik konkurenční mnoho starostí. Jeho princip je velmi jednoduchý, bývá uváděno, že k jeho objevení přispělo studium prostorového efektu, používaného u některých klasických varhan, vybavených pro každý tón dvěma stejně laděnými píšťalami. Rozdílnými tlaky vzduchu, vháněnými do obou píšťal, se dosahuje vzájemných amplitudových a fázových odchylek obou jinak stejných tónů. Tímto způsobem bývají realizovány registry vox humana, vox celeste aj. Přišlo se na to, že



Obr. 60. Konvenční cesty zpožďování analogových akustických signálů (1 - mazací hlava, 2 - záznamová hlava, 3 - reprodukční hlavy)

Jedněmi z nejrozšířenějších doplňkových zařízení, přinášejících skutečně mimořádný kladný přínos subjektivnímu vnímání, jsou zpožďovací systémy, jimiž jsou vytvářeny dozvukové a ozvěnové efekty. Dosud nejznámější a nejužívanější jsou mechanické a elektromechanické způsoby vytváření těchto efektů (obr. 60).

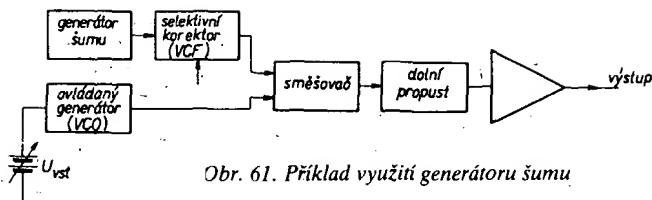
Nejstarší je první způsob, u něhož se zpoždění dosahuje šířením mechanického rozruchu jednou nebo více předpjatými kovovými pružinami. Elektromechanické měniče bývají řešeny jako elektromagnetické nebo piezoelektrické; systémy mají vždy určitou selektivitu a lze s nimi dosáhnout dobrých výsledků, často i při amatérské konstrukci:

U druhého způsobu je zpoždění signálu založeno na rychlosti šíření zvuku v homogenním akustickém kanále. Elektroakustický měnič (vysílač) je napojen na šroubovovitě stocenou trubíčku. Při délce trubíčky 150 m je zpoždění signálu, snímaného mikrofonem, přibližně 0,5 s. Při sepnutém spínači (obr. 60b) je možno ovlivňovat vzájemný poměr přímého a zpožděného signálu. Tento způsob jsme orientačně ověřovali s bužírkou z plastické hmoty jako zvukovodem a sluchátky k tranzistorovým přijímačům na místě obou elektroakustických měničů a výsledky byly povzbuzující.

Třetím způsobem, užívaným nejčastěji, je „playbackové“ snímání přes nekonečnou smyčku (obr. 60c). Výstupní signál lze ovládat kombinacemi úrovní výstupů od jednotlivých snímačů hlav a přímého signálu. Zjednodušeně lze tento systém realizovat i amatérsky dodatečným vestavěním přídavné snímací hlavy do magnetofonu. Je ovšem třeba dodat, že ne každý magnetofon je pro takovou úpravu vhodný.

podobných, ale i odlišných efektů je možno dosáhnout elektromechanickou cestou i u nástrojů elektronických, což je právě systém Leslie, někdy také označovaný jako systém rotujícího reproduktoru nebo, ne zcela správně, fázové vibrato. Princip Leslie efektu je založen na prostorovém a kmitočtovém „pohybu“ akustického zdroje; k realizaci se používá mechanická rotace některého z prvků pomocné cesty akustického signálu (reproduktor, odražná deska, mikrofon). Rotace vytvářá dojem prostorového pohybu akustického zdroje, což mikrofon nebo posluchač vnímá podobně jako Dopplerův jev; tj. jako kolísání kmitočtu sledovaného tónu a cyklické změny polohy jeho zdroje. Tento charakteristické kombinace lze zřejmě dosáhnout pouze elektrickou cestou. Charakter efektu je možno v širokých mezech ovlivňovat především rychlosť rotace. Například pomalá rotace je typická pro „katedrální“ efekt, který ve spojení s dozvukovým zařízením umožňuje v širokých mezech kompenzovat nevhodující akustické podmínky koncertních prostor. Problémem tvorby Leslie efektu jsou vysoké náklady na zabezpečení spolehlivosti rotujících kontaktů, na odstup hlukohrného systému a na další zpracování signálu. Proto jsou v současné době perspektivní pouze systémy, které tyto a mnohé další efekty realizují elektronickou cestou. Jedno z nejmodernějších řešení si ještě dále stručně pojďme.

Zvláštní místo mezi prostředky k vytváření různých zvuků a efektů zaujímají aplikace generátorů šumu. Princip jejich využití je



Obr. 61. Příklad využití generátoru šumu

blokově znázorněn na obr. 61 a porozumíme mu blíže po prostudování kapitoly věnované syntetizérům. Naznačeným způsobem je možno získat signál s definovaným dominantním kmitočtem a s mimořádně bohatým spektrálním obsahem. Oba tyto základní parametry mohou být ovlivňovány buď ručně nebo automaticky. Tak bývají napodobovány některé jinak těžko vystižitelné nástroje, jako např. bici, vytvářené zvuky zcela nové, typu sciencé fiction, velmi užitečné pro scénické a jiné aplikace.

Další důležitou cestou k obohacení kvalitativních vlastností nástrojů je komplexní zdokonalování jejich jednotlivých prvků. Například vývoj ovládacího systému (jako interface mezi manuálem a vlastním elektronickým systémem) je nesporně teprve na začátku. Technologický rozvoj jistě umožní komerčně řešit regulaci dynamiky jednotlivých tónů a nejsou vyloučeny ani jiné možnosti. S tím úzce souvisí i nutnost perspektivně řešit programovatelné generování obálky nejen co do dynamiky, ale i po stránce časového průběhu spektrálního složení. V této oblasti již bylo např. u syntetizérů dosaženo obrovského pokroku. Dalším, již poměrně široce užívaným obohacením zvukového projevu jsou automatické nebo polohomatické generátory pozadí nebo rytmického doprovodu, známé rytmické boxy a composersy. Pracují obvykle na digitálním principu, ale také s využitím rotačních disků nebo magnetopáskových přehrávačů.

Velmi často, zvláště v amerických konstrukcích, se používá vestavěný kazetový magnetofon, ať již v součinnosti s obvody pro doprovod nebo k vytváření efektů, nebo při cvičení pro sebekontrolu.

Rada uvedených, ale i jiných systémů, triků a efektů již dnes, ale především v budoucnosti bude využívat technologického rozvoje. Typickými příklady obvodů ke konstrukci hudebního nástroje jsou digitální a paměťové obvody, posuvné analogové registry, zvorkovací obvody, aktivní filtry a napěťové řízené obvody. Navažme na tyto úvahy alespoň stručnou zmínu o principech a řešení komplexních systémů syntetické tvorby zvukových signálů a čistě elektronickém řešení efektů typu Leslie.

### Syntetizéry

Ekonomické a technické důvody jsou příčinou toho, že klasické elektronické nástroje, navzdory široké variabilitě zvukového zabarvení a množství efektů, nevyužívají plné možnosti tvorby zvukových signálů, které nesporně existují. Od dob, kdy elektronické nástroje musely tvrdě bojovat o svoji existenci a uznání svého místa v legitimní hudbě, se již mnohé změnilo. Dnes, kdy v oboru elektronické hudby působí mnozí známí skladatelé a umělci, si některá hudební odvětví, zvláště moderní, zábavné a tančení hudby bez této nástrojů ani neumíří představit. Současně s tím však vznikají požadavky na kvalitu a zvláště škálu výrazových možností nástrojů. Zatímco dříve byly proti aplikaci elektroniky v hudbě námitky, nyní si potlačením tradic hudba sama vymuje nové, ne-

konvenční výrazové prostředky, přesahující možnosti běžných nástrojů.

V poslední době se objevil nový obor elektronických nástrojů, který možnosti syntetické tvorby zvukových signálů využívá mnohem komplexněji, ovšem také zcela jiným způsobem než běžné nástroje. Protože v naší literatuře o těchto nástrojích, syntetizérech, dosud nebyla žádná zmínka, věnujme se jím alespoň stručně, jíž vzhledem k tomu, že řada poznatků z tohoto odvětví bude v budoucnosti jistě aplikována i u klasických elektronických nástrojů, s nimiž mají zatím syntetizéry společně snad pouze manuál. Tím podobnost prakticky končí, nehledě na to, že i manuál se u nich používá zcela jiným způsobem. I jednotlivé typy nástrojů se poměrně výrazně liší, všimněme si proto především technických principů a některých zajímavých aplikací.

Syntetizér jsme jistě všichni viděli alespoň v televizi. Vypadá jako krátký klávesový nástroj s rozsahem tří až čtyř oktav, vybavený řadou spínačů, tlačítek, konektorů a mnohdy spíše ne hudební nástroj připomínají analogový počítač. Charakteristickou vlastností syntetizéru jsou jeho mimořádně velké možnosti napodobovat zvuk klasických nástrojů i jiných, podle běžných měřítek nehudebních nebo zcela nových zvukových signálů. Tak například je možno napodobit jedoucí vlak, housle, pláč dítěte atp. V tomto ohledu je práce se syntetizérem velmi citlivá také na schopnosti hudebníka rozpoznat hranici mezi uměleckými a technickými požadavky (při přechodu z jednoho zvukového zabarvení na jiné apod.). Teoreticky je však škála zvukových zabarvení neomezená.

Syntetizér není možno přímo srovnávat s jiným hudebním nástrojem. Tak třeba na piano může, byť i nedokonale, okamžitě hrát kterýkoli hudebník, dělat pauzy atd. Naproti tomu syntetizér je ke hře nutno nejprve připravit, k čemuž je nutná znalost jeho vnitřní organizace. Příprava spočívá v nastavení určitých kódů, signálových cest a dalšího zpracování signálu. Teprve potom je syntetizér schopen činnosti. Vlastní práce se syntetizérem není ani tak těžká, jako zcela neobvyklá. Musí překonávat řadu překážek, problémy jsou nejen uměleckého, ale i technického rázu, promítají se dále v potřebě speciální instruméntace pro tento nástroj. Z hlediska technických problémů jsou u klasických syntetizérů nejzávažnější dva. Prvním je možnost produkovat pouze jedinou notu, jediný tón v reálném čase, podobně jako u jednohlasých nástrojů. Druhým problémem je možnost produkovat pouze jedinou zvukovou kvalitou v tomto čase.

Ná nástroj se tedy v reálném čase hraje jako na jednohlasý – pokud je třeba změnit zvukové zabarvení, je nutno hru zastavit a přeprrogramovat nástroj. Tímto způsobem se také často skutečně hraje.

Při výčlascích hru nebo produkci se složitějšími efekty se využívá zážnam na magnetofonový pásek. Hudebník zaznamenává jednotlivé úseky své kompozice, zastavuje zážnam, přeprrogramovává nástroj a znova nahrává. Stejným způsobem může být sestavena jednohlasá melodie nejrůznějších postupných kvalit zvukového zabarvení. V obou případech samozřejmě není možno přímo hrát v reálném čase, ale pouze ze zážnamu. Magnetofon musí mít speciální ovládací zařízení pro přesnou a právě žádanou synchronizaci jednotlivých složek signálu nebo stop.

Tak je například možno s použitím syntetizéru nahrávat společnou produkcii „různých“ nástrojů, nebo hrát jednohlasou melodii na jedné stopě, pozadí, harmonii nebo rytmus na ostatních stopách magnetofonu.

Možnost hry v reálném čase v určitém slova smyslu existuje při společné hře několika syntetizérů, případně ještě dalších nástrojů. Pak může jeden nebo dva syntetizéry hrát, zatímco ostatní ladí a přeprrogramovají své nástroje. Tato cesta je ovšem schůdná pouze pro studiové nebo podobné nahrávky vzhledem k vysokým nákladům a potřebě neúnosného počtu hudebníků stejného zaměření. Častější je určitá vzájemná spolupráce polyfonického nástroje a syntetizéru. Přes naznačené problémy přináší syntetizéry do moderní hudby zcela nové perspektivy, které jsou teprve upřesňovány vzhledem k bouřlivému rozvoji oboru.

Jaká je však technická stránka těchto nesporně zajímavých nástrojů? Principem se neliší od našich představ o vytváření akustických signálů elektronickou cestou. Výsledné zvukové zabarvení je určováno spektrálním složením signálu a jeho modulační obálkou. Na obě tyto základní definice tónového signálu je však u syntetizéru možno působit v celém průběhu jejich trvání obvody, kterými je signál vytvářen a zpracováván.

Syntetizéry generují v zásadě tři druhy elektrických signálů:

1. akustické,
2. řídicí,
3. spouštěcí.

Akustické signály jsou vlastním produktem syntetizéru. Řídicí signály ovládají kvalitu akustických signálů, především výšku a zabarvení tónů. Spouštěcí signály ovládají mimo jiné i stavy start/stop programu. Jsou často vybavovány ručně, ale elektronické obvody tuto práci maximálně usnadňují.

Většina syntetizérů vytváří základní tóny z jednoho nebo několika tónových generátorů a také generátoru šumu. Tónový generátor produkuje v určitém čase pouze jediný tón, kdežto generátor šumu celé široké spektrum. Tónový generátor může pracovat v celém akustickém pásu; výstupní signály každého z generátorů (nejčastěji pravohlého a pilovitého někdy i sinusového průběhu) jsou paralelní (vyskytují se současně) a mohou být libovolně vybírány nebo kombinovány. Kmitočet oscilátoru se mění při přerušení činnosti, může však být měněn v požadovaném rozsahu i plně. Ze signálu generátoru šumu je vybíráno pouze úzké spektrum, tzv. růžový šum. Hudebník má možnost ovládat jeho amplitudu a dominantní kmitočet.

Nejdůležitějším systémovým přinosem syntetizérů je to, že kmitočet i amplitudu (včetně ostatních parametrů) každého generovaného signálu je možno ovládat nejen ručně, ale i řídicími signály. Systém využívá analogového, napěťového ovládání. Základními stavebními prvky syntetizéru jsou především:

1. napěťově řízený oscilátor (VCO – voltage controlled oscillator),
2. napěťově řízený filtr (VCF – voltage controlled filter) a
3. napěťově řízený zesilovač (VCA – voltage controlled amplifier).

Napěťovému ovládání je podřízena i činnost manuálu. Stisknutím každé klávesy se snímá určitá napěťová úroveň, určená odpovídajícím dělicím poměrem odporové sítě pro to které pořadí klávesy. Napětí této úrovně je vyvedeno na konektor nebo přepínači sběrnici. Připojíme-li výstup z konektoru například na VCO, odpovídá kmitočet oscilátoru tónu, jehož klávesu jsme stiskli. Nemusí tomu tak být vždy, protože intervaly mezi klávesami je možno upravovat. Výstup však může být zápojen i na jiné napěťově citlivé obvody – pak je možno řídit hlasitost (pomoci VCA), zvukové zabarvení (pomoci VCF) a jiné parametry. Manuál syntetizéru tedy

může sloužit k ovládání řady různých funkcí. Zvláštní význam mají i obvody, umožňující ovlivňovat nebo programovat časový průběh řidicích signálů – jejich aplikací lze získat kupř. neustálé, mnohdy co do charakteru velmi složité kolísání výšky nebo modulační obálky tónu, nebo ovšem také obou uvedených parametrů současně. Stejně může být ovlivňováno i zvukové zbarvení.

Nejdůležitější jsou však tři základní prvky syntetizéru. U VCO (u nás spíše známý jako převodník napětí/kmitočet) se neřídí opakovací kmitočet obvodovým prvkem (odporem, kondenzátorem), kmitočet jeho výstupního signálu je přesně lineární funkcí vstupního (řídícího) analogového napětí. Převodní charakteristika,  $w = f(U_{vs})$  se tedy vyznačuje určitou, stabilním strmostí konverze  $X$  [Hz]/ $V$ .

Jako zjednodušený, názorný příklad napětové řízeného zesilovače (VCA) můžeme uvést již zmíněné zapojení na obr. 58 s tranzistorem FET. V tomto případě je řízení negativní – nulovému řídicímu napětí odpovídá plný zisk, minimální zisk je při určitém záporném řídicím napětí. I když není převodní charakteristika VCA přesně lineární, můžeme opět počítat s určitou průměrnou strukturou útlumové charakteristiky –  $Y_{\text{d}}[V]$ .

Rovněž u napěťového řízení filtrů odpovídá základně kritického nebo rezonančního kmitočtu změně například o jednu oktašavu určitá změna řídícího napětí, např. 1 V.

Kmitočtové charakteristiky tří základních obvodů, užívaných v syntetizérech, jsou na obr. 62. Je samozřejmé, že přesně realizovat požadované funkce VCO, VCA a VCF klade značné nároky na kvalitu a stabilitu jednotlivých obvodů. Jsou to však vesměs problémy bezpečně zvládnuté, ať již integrovanou, nebo hybridní technologií. U nás jsou podobné obvody zatím nedostupné.

Jako jednoduchý příklad aplikace napětově řízeného zesilovače si uvedeme blokové schéma obvodu, generujícího modulační obálku akustického signálu, obr. 63. Generátor je možno spouštět ručně nebo automaticky. Při automatickém ovládání se používá taktovací signál ve tvaru hodinových impulů. Při ručním ovládání systém pracuje při sepnutém kontaktu. Použije-li se v obvodu, generujícím řídicí napětí pro VCA, výstupní napětí VCO určitého průběhu, pak tímto výběrem definujeme dobu trvání jednotlivých úrovní a tedy charakter řídicího signálu. Tímto signálem, který ovládá zisk VCA, je definována obálka časového průběhu akustického signálu. Při ručním ovládání klávesami je možno navíc tuto obálku libovolně ovlivňovat úrovní právě přiváděného analogového napětí.

Systém napětově řízených obvodů, ve spojení s magnetickým záznamem, však může zajišťovat řadu dalších zajímavých aplikací. Jednou z nich je napodobování akustických odražů. Efekt spočívá v sekvencích kombinacích různých generovaných signálů.

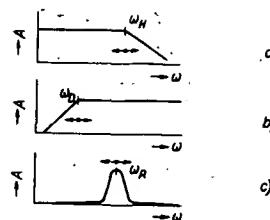
„Páskové echo“ je druh ozvěny – kombinace přímého signálu s přesně řízenými zpožděnými nebo opakovanými signály.

Další efekt ke změně barev používá kruhové modulátory se dvěma vstupy, jeden pro akustický a druhý pro modulační signál. Z výstupu modulátoru se odebírá algebrický součet obou signálů, kdežto původní, vstupní signály jsou potlačeny.

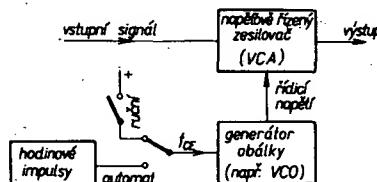
U syntetizérů se používají také známé efekty „fuzz“ a „WA-WA“. Fuzz je založen na dodatečném vytváření vyšších harmonických složek u signálů, jejichž spektrum je relativně chudé. Wa-Wa využívá přešlování napěťové řízených filtrů. Oba efekty jsou obvykle ovládány pedálem.

Dalších efektů lze dosáhnout napříč řízenými směšovači, které upravují proporce dvou nebo několika řídících signálů, programujících jednotlivé nebo kombinované efekty.

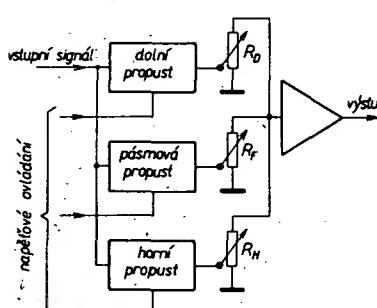
Velice užitečné jsou ekvalizéry. Jsou to



Obr. 62. Přenos charakteristických kmotočtvé závislých prvků; a) dolní, b) horní a c) pásmová propust



Obr. 63. Generování a ovládání průběhu modulační obálky



Obr. 64. Použití napěťově řízených filtrů v ekvalizéru

vhodné sestavy napěťově řízených filtrů a propustí, jimiž se filtrují určité oblasti akustického pásma kmitočtů. Blokové schéma ekvalizéru je na obr. 64. Z obrázku je zřejmé, jak efektivně je možno s jednoduchou soustavou tří napěťově řízených filtrů upravovat přenosové charakteristiky co do kmitočtové oblasti nebo rádu filtru.

Kompresory a limity jsou další oblasti aplikace VCA – efekty jim vytvářené užívají mnohonásobného zesílení nebo potlačení úrovně původního signálu.

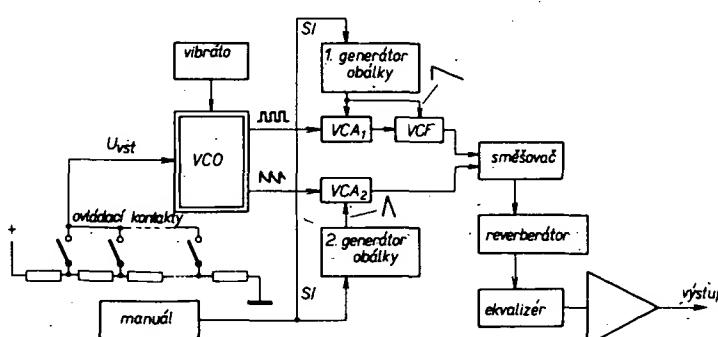
Možnosti systémového a obvodového řešení nástrojů s využitím napěťově ovládaných prvků je samozřejmě mnohem více, uvedli jsme si pouze nejdůležitější a nejzajímavější.

Celá tato perspektivní oblast prochází neu-  
stálým vývojem, proto se, pokud bude zájem,  
budeme se zajímat o systémy průběžně  
seznamovat na stránkách AR.

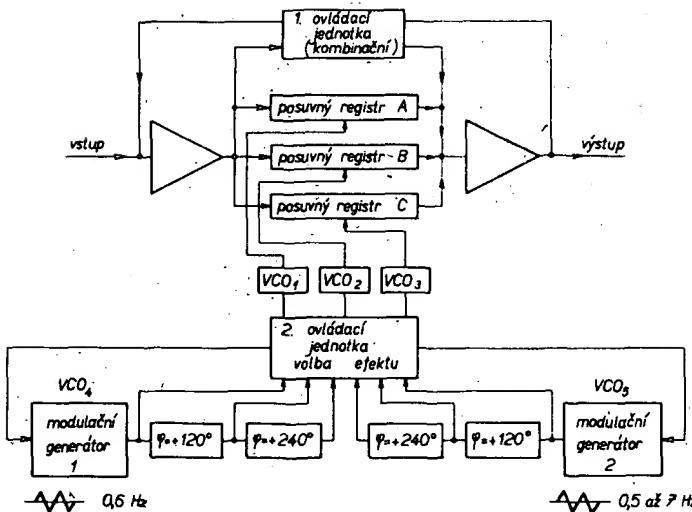
Využijme v závěru toho, co jsme si o jednotlivých problémech a prvcích typických pro syntetizér dosud řekli, k popisu blokového schématu a činnosti klasického syntetizéru. Jádrem celého systému je základní VCO, jehož opakovací kmitočet je ovládaný klávesami. Taktto ovládané tóny odpovídají stupnici temperovaného ladění. Jako u ostatních popisovaných systémů může být kmitočet VCO rozmitán (vibrato). VCO (obr. 65) má vždy minimálně dva paralelní výstupy – zde se signály pravoúhlého a pilovitého průběhu. Naznačené uspořádání obsahuje také dva generátory obálky, tedy obvody, vytvářející řídicí napětí pro VCA, VCF nebo jiné prvky. První generátor vytváří napětí pro VCA<sub>1</sub> a VCF v cestě signálu pravoúhlého průběhu, který může být téměř obvody ovlivňován jak jednotlivě, tak jejich společnou činností. Druhým generátorem obálky je přes VCA<sub>2</sub> ovlivňován časový průběh signálu pilovitého průběhu. Oba generátory obálky jsou ovládány spouštěcími impulsy, synchronizovanými se stiskem klávesy, tedy s přiložením řídicího napětí na VCO. První generátor je určen pro časově delší tvarování, druhý generátor naopak pro krátké. VCF v kanálu se signálem pravoúhlého průběhu s „pomalým“ generátorem obálky ovlivňuje spektrální obsah tohoto signálu plynulým přešládováním filtru v závislosti na okamžité velikosti řídicího napětí. Součinností obou generátorů obálek a VCA v obou větvích navíc je tak vytvářeno pole pro široké možnosti úpravy nejen modulační obálky, ale i proměnného zvukového zabarvení. Výstupy obou kanálů jsou slučovány ve směšovači, upravujícím jejich poměr a zaváděny do dalších stupňů (především ozvěnový nebo dozvukový systém, reverberátor a ekvalizér). Není snad třeba dodávat, že směšovač, reverberátor a ekvalizér jsou opět napěťově ovládaný řídicími signály. Počtem a úpravou jednotlivých řídicích signálů je možno ovlivňovat zvukové zabarvení, modulační obálku, charakter i množství triků a efektů v rozsahu, který nemůže být zatím srovnáván s žádným jiným nástrojem nebo systémem.

## Elektronické vytváření efektů

Zmínili jsme se již, že soudobý trend řešení složitých a drahých efektů typu Leslie, dosud vytvářených elektromechanickou cestou se zmíněnými nedostatky a problémy, směřuje ke konstrukci čistě elektronickou cestou. Tento dá se říci převrat je umožněn technologickým pokrokem v realizaci paměťových a jiných obvodů. Elektronické systémy umožňují regulovat intenzitu a „rychlosť“



Obr. 65. Blokové schéma jednoduchého syntetizéru (SI – spouštěcí impulsy)



Obr. 66. Blokové schéma doplňkového generátoru efektů (Wersivoice)

efektů bez výraznějších omezení a s velkou spolehlivostí. Obecným principem je rozdělení cesty signálu do několika kanálů, u nichž je možno ovlivňovat a „modulovat“ zpoždění signálů. Sloučením signálů jednotlivých kanálů a přímého signálu v různých poměrech je možno vytvářet skutečně širokou škálu efektů chorusového a orchestrálního typu (s těmito systémy lze např. napodobovat dojem z poslechu celého smyčcového orchestru). Řada výrobců takové přístroje vyrábí bud jako díly elektronického nástroje, nebo jako doplňky k témuž nástrojům.

Všimněme si alespoň stručně zajímavého řešení firmy Wersi-elektronics, které bylo vystavováno na frankfurtském veletrhu v r. 1976. Systém může pracovat v součinnosti nejen s elektronickým nástrojem, ale i s jiným zdrojem, například s kytarovým snímačem nebo mikrofonom, je víceúčelový, může produkovat řadu efektů jak jednotlivých, tak v kombinacích. Tento příklad jsem zvolil hlavně proto, že je u něj zřejmá určitá návaznost na technické řešení syntetizérů, i když se obvody používají jiným způsobem.

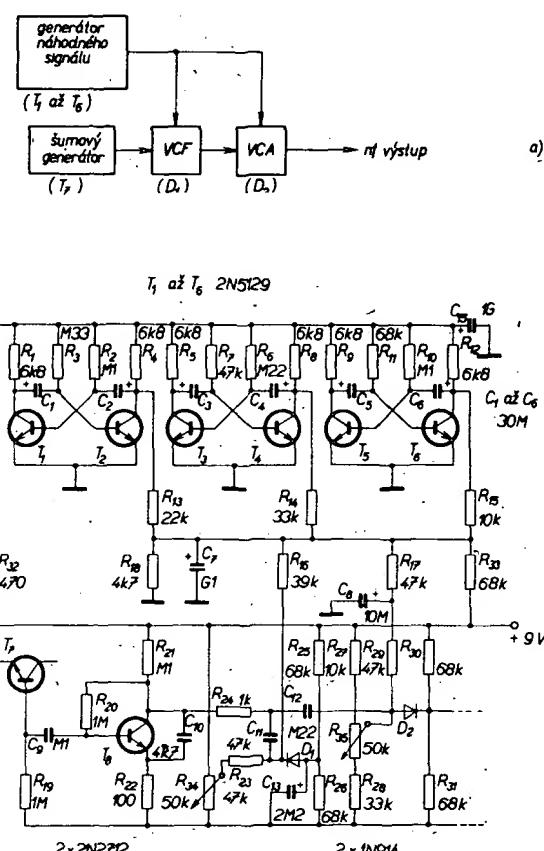
Blokové schéma víceúčelového elektronického systému Wersivoice je na obr. 66. Jádrem jsou tři analogové posuvné registry. Při průchodu signálu této obvodu dochází ke zpoždění, které je závislé na kmitočtu hodinových impulsů a může být u každého ze tří kanálů různé. Hodinové impulsy jsou vytvářeny třemi napěťově řízenými oscilátory (VCO), z nichž každý přísluší jednomu posuvnému registru. Navíc může být každý VCO nezávisle kmitočtově rozmitán vhodně upraveným řídicím napětím. Tím je umožněna široká variabilita fázových odchylek výstupních signálů všech tří posuvných registrů. Okamžitá velikost zpracovávaného analogového signálu je do každého registru (s více jak 500 paměťovými buňkami) ukládána ve skočích, řízených hodinovými impulsy z příslušného VCO.

Organizace registrů je následující – v prvním taktu je okamžitá velikost analogového signálu uložena do první buňky. Ve druhém taktu je obsah první buňky přenesen do druhé. Ve třetím taktu je obsah druhé buňky přenesen do třetí a současně se do první, nyní volné buňky, ukládá vstupní signál okamžité velikosti. Celý tento cyklus se periodicky opakuje. Úpravou signálu hodinového kmitočtu je možno v jistých mezech ovládat zpoždění signálu, úměrně tomuto kmitočtu a kapacitě registru. Hodinový kmitočet je

upravován na sinusový. Z uvedených základních signálů jsou v obou modulačních generátořech obvody s dvoustupňovým fázovým posuvem vytvořeny trojice vzájemně posunutých signálů. Z těchto šesti modulačních signálů jsou v ovládací jednotce vytvářeny kombinace řídicích napětí pro VCO podle právě žádaného efektu. Tako jsou ovládány základní charakteristické rysy efektů a pomalá nebo rychlá „rotate“.

Druhá ovládací jednotka upravuje především dynamickou výraznost efektů úpravou vzájemných poměrů jednotlivých signálových cest. Zdůrazněme, že všecky činnosti, včetně ovládacích jednotek, je napěťově řízena, což kromě operativního ovládání přináší také možnost dálkového ovládání, například režisérem nebo zvukarem.

Myslím, že nyní můžeme ukončit tuto první část, kterou jsem se snažil upravit tak, aby čtenář našel systematicky seřazeno co možno největší množství základních informací, postřehů a upozornění na kritická místa jednotlivých systémových řešení, tedy to, co jsem sám při práci nejvíce postrádal. Je samozřejmé, že v tomto stručném shrnutí nemůže být obsaženo vše, již vzhledem k tomu, že amatérský zájem jednotlivce je nedostačující základnou k získání úplného a fundovaného přehledu o celé problematice. Vždyť desítky a stovky světových výrobců v tomto, v současné době z komerčního hlediska větice úspěšném odvětví spotřební elektroniky, neustále chrlí nová a nové přístroje s novými způsoby řešení, o nichž ani nevím. Domnívám se, že právě z hlediska orientace v nových řešeních, při vývoji nových zařízení a při posuzování stavebních návodů, které jsou pro laického zájemce o konstrukci vesměs příliš specializované a tím ne vždy dosti srozumitelné, by měly být dosavadní rádky užitečné. Je samozřejmé, že ne každého bude zajímat vše, co bylo dosud napsáno. Pro většinu čtenářů však bude i tato stručná procházka základními principy a problémy užitečná již z toho důvodu, že v naší literatuře je právě v této oblasti v současné době citelná mezera.



Obr. 67. Příbojový syntetizér: a) blokové schéma, b) zapojení

## Problémy systémového a obvodového návrhu nástroje

### Koncepce nástroje

Realizace nástroje je vždy spojena s určitými problémy a kompromisy. Široká škála kvalitativních skupin a systémových řešení nástrojů, poměrná složitost v důsledku značného počtu obvodových prvků, konstrukčních a mechanických detailů a jiné důvody zabírají jednoduchému a jednoznačnému řešení. Z amatérského hlediska jsou zvláště závažné problémy s výběrem koncepce systému, mechanického řešení a s nimi souvisejícími otázkami stability a spolehlivosti. Zvláštní místo zaujímá hodnocení nástroje z hlediska jeho univerzálního využití, včetně aplikací trikových signálů efektů.

Hodnotíme-li naznačené požadavky zcela nezaujaté, pak je mohou splnit nejspíše nástroje polyfonní. Je nesporným faktem, že takový nástroj je možno, a dokonce bez mimořádných technických problémů, realizovat. Většinu konstruktérů však odrazují v prvé řadě poměrně značné náklady, má-li být nástroj kvalitní, za druhé je nutno počítat s kvalitním dílenckým vybavením a s časem, nutným na stavbu, což jsou důvody, pro které již nejedna konstrukce skončila předčasně. Ze stejných důvodů je také většina amatérských nástrojů řešena jinak, jejich typickým znakem bývá snaha celý systém zjednodušit. Většinu se využívá faktu, že se nástroj ve srovnání s klasickými klávesovými nástroji, například s klavírem používá nekonvenčním způsobem. Tradiční uspořádání klávesnice v oktavovém rozsahu ovšem musí být zachováno. Jednohlasými a vícehlasými nástroji jako představiteli zjednodušené verze nástrojů jsme se již ze systémového hlediska zabývali. Myslím, že cesta zjednodušování je za určitých předpokladů správná, vždyť každý, i klávesový nástroj má svá specifika, která je nutno respektovat. Došťáváme se tak k problému vlastního využití nástroje, což zdaleka není zanedbatelné. Je možno důvodně předpokládat, že mezi těmi, kdož jsou schopni si nějaký nástroj postavit, bude dřívá většina mnohem schopnějších konstruktérů, než muzikantů. Potom rozhodně nemá smysl věnovat léta práce a značné finanční prostředky na realizaci nástroje, který vlastně nedokážeme plně ovládnout. Před stavbou je tedy v první řadě třeba důkladně rozebrat vlastní požadavky a možnosti, aby bylo předem zaručeno, že výsledek bude po všech stránkách úspěšný.

Jaké jsou možnosti jednodušších koncepcí? Většina konstrukcí, přicházejících v úvahu, jsou v podstatě variace nebo kombinace řešení, jimž jsme se již zabývali.

Nejjednodušší a nejlevnější jsou jednohlasé nástroje. Jsou dobrým úvodem do celé problematiky, jejich možnosti jsou však natolik omezené, že konstrukci je možno doporučit pouze mladým zájemcům bez finančních a jiných prostředků. Vhodnými příklady jsou zapojení na obr. 25, oblibený Minifon [14] a řada jiných. Poměrně zajímavá uplatnění v orchestru mohou najít i varianty těchto nástrojů s plným laděním – o jednotlivých možnostech jsme se již stručně zmínilí.

Zjednodušená řešení polyfonních nástrojů jsou druhým extrémem skupiny levnějších nástrojů. Jako typického představitele můžeme uvést konstrukci [15], která je sice poměrně levná, ale technologicky náročná. Sám bych v těchto případech doporučoval konstrukci se zjednodušenou sběrnicí (některými možnostmi úprav jsme se zabývali), nebo se sběrnicí elektronickou. Příklad kvalitní konstrukce je v [16]. Polyfonní nástroje je vhodné členit do několika samostatných desek, opatřených konektory, nejlépe rozdělených podle základních generátorů. Stavbu

těchto nástrojů je možno doporučit především výkonným hudebníkům, kteří mohou zhodnotit výsledek časově a finančně náročné konstrukce.

Velmi zajímavou aplikaci v orchestru naleznou i jednoduché syntetizéry, i když v amatérské praxi v současné době přicházejí v úvahu především jednohlasé systémy, používané v reálném čase. Mnohé skupiny také tímto způsobem syntetizérů využívají. Sám jsem si ve volných chvílích primitivní systém tohoto typu na stole „uplácal“ a mohu říci, že výsledky jsou skutečně zajímavé. Jako VCO byl použit jednoduchý převodník  $U/f$ , jehož návrhem a konstrukcí jsem se zabýval v [18].

Pro toho, kdo se chce levně prakticky seznámit s napěťově řízenou syntézou zvukových signálů, je na obr. 67 zapojení, vytvářející efekt šumění moře, mořského příboje. Konstruktérem je J. S. Simonton. Podstata činnosti je velmi jednoduchá a prakticky odpovídá systému, znázorněnému na obr. 61 s tím rozdílem, že řídící napětí a VCO jsou nahrazeny zdrojem náhodného signálu. Signál působí na okamžité parametry VCF, zde nahrazeného napěťově řízenou dolní propustí a VCA, nahrazeného napěťově řízeným útlumovým článkem.

Generátor náhodného signálu je vytvářen vahovou kombinací výstupních signálů tří nesynchronizovaných, volně kmitajících a stabilních multivibrátorů. Charakter signálu je upraven nesymetrií a různými opakovacími kmitočty jednotlivých multivibrátorů, jejich různými váhami ( $R_{13}$  až  $R_{15}$ ) a kmitočtovou filtrací ( $C_7$ ). Tranzistor  $T_1$  pracuje jako generátor šumu, využívá závěrné polarizace přechodu báze-emitor, tranzistor  $T_5$  pracuje jako impedanční oddělovač a zesilovač. Základní nastavení napěťově řízené dolní propusti s prvky  $R_{24}$ ,  $C_{11}$ ,  $D_1$ ,  $C_{13}$  je možno upravovat odpovídoucím trimrem  $R_{14}$ . Propust, ovládaná napětím z generátoru náhodného signálu, využívá neelineární voltampérové charakteristiky diody  $D_1$ , pracující jako napěťově ovládaný diferenciální odpor. Při zvětšování řídícího napětí se dioda přivírá, čímž se rozšiřuje přenosové pásmo propusti směrem k vyšším kmitočtům. K tomu, aby byl napodoben také dynamický charakter příboje, slouží VCA s  $D_2$ ; stejným způsobem, tedy různým stupněm otevření diody v závislosti na řídícím napětí je ovlivňována modulační obálka signálu. Výstup zařízení je vhodný pro připojení k zesilovači.

I když je uvedené zapojení spíše hračkou, poskytuje určitou představu o možnostech, jak lze jednoduše, i když zdaleka ne přesně realizovat některé signály a napěťové řízené funkce.

V souvislosti s volbou koncepce je nutno řešit také problémy mechanické konstrukce nástroje. Nejzávažnější z tohoto hlediska je manuál a ovládací, zpravidla kontaktový systém. U manuálu je, kromě jeho vzhledu, dominantního pro estetický vzhled celého nástroje, nejdůležitější především lehký, rovnoramenný a tichý chod kláves ve směru stisku i uvolnění a dokonale uložení klávesy bez vkláni do stran. Z těchto důvodů je výhodné, iž vzhledem k řadě dalších problémů, použít klávesnice ze staršího piana, harmonie nebo akordeonu, které je občas možno poměrně levně odkoupit z opravny těchto nástrojů. Klávesy lze zhotovit i amatérsky, to je však cesta pracná a v běžných podmínkách obvykle i neúspěšná, především co do vzhledu manuálu. Rozměry kláves při zvolení této cesty by měly odpovídat klávesám některého z již zmíněných nástrojů.

Spínací systém je nejvhodnější řešit s reléovými spínacími nebo přepínacími kontakty, s tvrdě pokovenými kontaktními ploškami, společně uloženými na tuhé, kovové nosné liště.

Klávesy a kontakty musí být uspořádány tak, aby byl zajištěn dostatečný zdvih-kontaktu při stisku i uvolnění klávesy.

Různými způsoby, konstrukce manuálu a ovládacího kontaktového systému se podrobnejší zabývá literatura [2], [3], [12]. S jedním z možných způsobů, užitým ve vzorku dalej popisované konstrukce, se ještě detailně seznámíme.

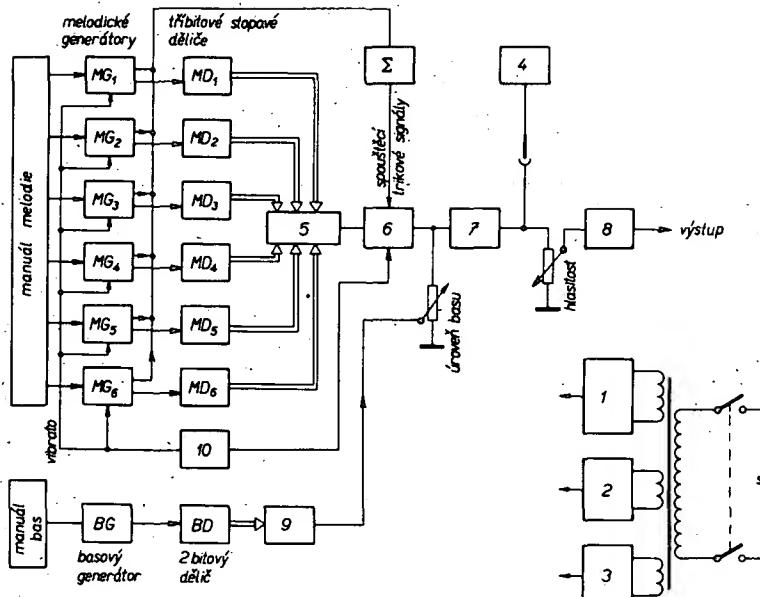
### Blokové schéma popisovaného nástroje

V následujících řádcích jsou diskutovány problémy, které vedly k volbě koncepce popisované konstrukce, jejímž cílem je usnadnit relativně širokému okruhu zájemců stavbu elektronického hudebního nástroje.

Při hodnocení kvalitativních parametrů, ekonomické stránky, časové náročnosti a účelnosti byla z řady důvodů vyloučena konstrukce polyfonního nástroje, přestože je technicky bezesporu nejlepším řešením. Aby tento příspěvek splnil svoji úlohu, nemůže být zaměřen pro potřebu několika jednotlivců. Tím ovšem není řešeno, že je popisovaná konstrukce jednoduchá. Stupeň přípustného zjednodušení musí být totiž omezen pouze tak, aby zůstala zachována univerzálnost nástroje, spolehlivost a stabilita spolu s perspektivou dlouhodobého užívání. Bylo tedy možné snahou navrhnout nástroj „slušných“ parametrů, s nimiž je na rozdíl od jednoduchých, nejlevnějších variant možno hrát i složitější skladby, ale omězit přitom problémy stavby, reproducovatelnosti a stability na minimum. Koncepce nástroje vychází z předpokladu, že je určen pro rekreační, zájmové provozování hudby. Rozhodně by s ním nebyl spokojen profesionální varhaník, ale ten by jej ani nestavěl, protože je zvyklý na své kvalitní (a drahé) „monstrum“ zcela jiné cenové kategorie. Kladem zvoleného řešení jsou naopak minimální rozměry a hmotnost i operativní přizpůsobení k činnosti, čímž v podmírkách běžných bytů odpadají známé problémy „kam s ním“.

Blokové schéma nástroje je na obr. 68. Koncepčně je řešen jako šestihlasý pro pravou ruku s rozsahem  $2\frac{1}{2}$  oktavy a jednohlasý pro levou (1 oktávu). Tato, jistě jedna z mnohých variant, byla podrobně diskutována s řadou muzikantů a zdůvodněna dříve. Způsob ovládání nástroje je netradiční a nelze jej bez zbytku srovnat s žádným klasickým klávesovým nástrojem. Má spíše podobnost s hrou na kytaru, kde je také možno hrát v akordických polohách a současně využívat basového doprovodu na spodních stranách. Ve srovnání s klavírem je výrazně zjednodušena koordinace obou rukou, což je výhodné z hlediska techniky hry pro „osobu neškolenou“. O stejné přednosti mne však přesvědčovali i ti, kteří chodili řadu let „do klavíru“. Na druhé straně však možnost součinnosti levé ruky přináší zajímavé obohacení hry, ať již jednoduchým basováním, jiným „melodickým“ vedením nebo rozkládanou hrou. Chtěl bych dodat, že na tento nástroj hrájí asi rok a dosud jsem mu ani zdále nedokázal sáhnout „na dno“, což bylo také jedním ze sledovaných cílů. Nástroj je vhodný i pro použití v menším orchestru, kde se obvykle hraje pravou rukou v blocích, levá ovládá rejstříky a efekty. Použití je možno najít i v harmonizaci melodie nebo instrumentací skladby.

Nástroje podobné koncepce se továrně nevyrobají. Důvody jsou zřejmé, průmyslová výroba vedle materiálových nákladů je velmi citlivá také na náklady výrobní, včetně nastavování, ladění a servisu nástroje. Z tohoto hlediska je zvolená koncepce nevhodná, protože musí být samostatně, na rozdíl od polyfonních nástrojů, laděn každý tón, každá



Obr. 68. Blokové schéma popisované konstrukce elektronického hudebního nástroje (1 – zdroj výkonového zesilovače, 2 – stabilizovaný zdroj  $\pm 12$  V, 3 – stabilizovaný zdroj +5 V, 4 – externí pedál dynamiky a formantového filtru, 5 – základní melodické registry, 6 – trikové obvody, tremolo, 7 – úrovnový zesilovač, 8 – výkonový zesilovač, 9 – basové registry,  $\Sigma$  – součtový logický obvod, 10 – generátor infravzukového signálu)

klávesa. Stejně závažný důvod je ten, že do nedávné doby nebylo možno realizovat tak stabilní nespojité generátory, které by zaručovaly úspěšný servis. Tento poslední důvod je zřejmě rozhodující pro to, že také amatérské nástroje nevyváží takto řešeny, bývají maximálně čtyřhlášné. Aby mohl být naznačený systém realizován, musel být především vyvinut nový systém základních generátorů s velkou stabilitou a dokonalou reproduktivitou.

Všimněme si znova blokového schématu na obr. 68: Vícehlasá část je vybavena šesti identickými generátory, vyznačujícími se velkou stabilitou a tím, že znemožňují vznik kliksů. Každý generátor je vybaven snímacím tranzistorem, dodávajícím spouštěcí impulsy pro trikové obvody. Celá šestice generátorů může být kmitočtově modulována ze sinusového generátoru infravzukového kmitočtu (vibrátor). Jednotlivé generátory jsou přes oddělovací spínací obvody propojeny s řetězem oktávových děličů v integrované formě. Melodická část má čtyři stopy 2', 4', 8' a 16'. Po zpracování v rejstříkových obvodech je signál pravé ruky ovlivňován efektem tremolo a trikovými signály (písťatové náběhy, pérkus) s volitelnou časovou konstantou. Úroveň hlasitosti „levé ruky“ vzhledem k „pravé“ může být upravována libovolně. Basový generátor levé ruky je vybaven třemi stopami, čímž je umožněn široký výběr tónové a spektrální kvality, podle povahy skladby nebo aplikace (sólo, orchestr). Úplný signál se zpracovává v úrovnovém zesilovači, k jehož výstupu lze připojit pedál pro ovládání dynamiky a volbu formantové oblasti. Aby byla umožněna operativní činnost bez dalších přidavných zařízení, je nástroj opatřen vestaveným výkonovým zesilovačem. Je tedy nutno připojit pouze reproduktoru skříň.

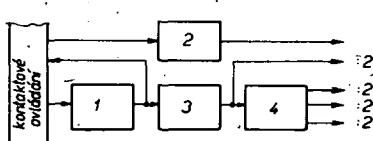
Samořejmě, že nejsou vyloučeny ani jiné úpravy nástroje, zejména pokud se týká počtu generátorů, koordinace obou rukou, rejstříkových obvodů aj. Tomu je ostatně uzpůsobena i mechanická koncepce nástroje. Pro tyto případné aplikace i pro konstrukci popisované úpravy je důležitá dokonalá znalost funkce a vlastností jednotlivých užitých

obvodů, které se do značné míry liší od ustálené koncepce. Před výkladem funkcí bych chtěl znova připomenout, že i když konstrukce nemá žádná oříšná místa, přesto se jedná o přístroj z elektronického i mechanického hlediska ve srovnání s běžnými např. zesilovači nebo přijímači poměrně složitý, proto je možno doporučit stavbu pouze těm, kdo mají alespoň průměrné znalosti z elektroniky. V žádném případě není možno předpokládat, že případný zájemce o tento druh nástroje, který neví, jak funguje tranzistor nebo IO, dosáhne úspěchu.

## Funkce a vlastnosti dílčích obvodů

### Základní generátorová jednotka

Symbolické schéma jednotky, generující stopové výšky jednoho tónu, použité v popsané konstrukci, je na obr. 69. V systému nejsou přímo vyznačeny oddělovací kliksů. Nejnáročnějším prvkem je vlastní multivibrátor, na který jsou ve srovnání s konvenčními aplikacemi kladený skutečně mimořádně požadavky. Jejich splnění má základní vliv na kvalitu celého nástroje. Za základní kritéria pro hodnocení generátoru je třeba považovat především dlouhodobou a teplotní stabilitu, snadné ladění jediným prvkem, minimální dobu ustálení kmitočtu, nenáročný ovládací systém, lineáritu kmitočtového rozmitání, nezávislost nebo vhodnou kompenzaci kmitočtové stability na tolerancích napájecího napětí, možnost blokování falešných tónů, potlačení kliksů, odolnost vůči rušení a vzájemnému rozladování jednotlivých generátorů a dokonalou reproduktivitou. Podcenění, kteréhokoli z uvedených bodů se

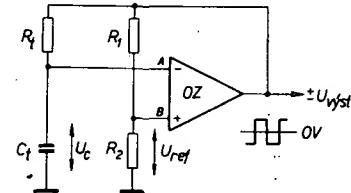


Obr. 69. Blokové schéma melodické generátorové jednotky (1 – astabilní multivibrátor, 2 – spouštěcí trikový výstup, 3 – interface, 4 – integrované stopové děliče TTL)

projeví v komplikovaném řešení následných obvodů nebo na výsledných parametrech nástroje.

Je nutno konstatovat, že běžná zapojení multivibrátorů, užívaná v podobných konstrukcích, nevyhovují především z hlediska reproduktivitelné kmitočtové stability. Důvody jsme se již zabývali. Vhodné aktívny prvky ze sortimentu světových výrobců, jako jsou například timery typu 555 a jiné, jsou běžně nedostupné. Z řady možných řešení bylo jako nejvhodnější zvoleno zapojení multivibrátoru s napěťovým komparátorem, v němž jako aktívny prvek pracuje operační zesilovač OZ. Protože u nás se toto zapojení prakticky nepoužívá a navíc je nedostatečně nebo nevhodně interpretováno, rozebereme si pro dokonalou orientaci jeho zapojení – to osvetlí jeho přednosti.

Ideové schéma multivibrátoru je na obr. 70. Kromě kompenzační kapacity se pro



Obr. 70. Multivibrátor s analogovým diferenčním komparátorem

nastavení určitého kmitočtu používají pouze čtyři prvky, tři odpory a jeden kondenzátor v můstkovém uspořádání. Vstupy OZ jsou zapojeny v úhlopříčce můstku tak, aby inverující vstup byl zapojen na integrační kondenzátor. Napěťová úroveň neinvertujícího vstupu je odvozena děličem  $R_1, R_2$  z výstupního napětí komparátoru, které skokově přechází z jedné do druhé saturační úrovně. Tímto způsobem se vyrovnává můstek s časovou konstantou  $\tau = R_1 C_1$ . Vzhledem k dobrým dynamickým vlastnostem OZ při opakovacím kmitočtu nižším než 5 kHz, velkému napěťovému zesílení  $A_v$ , minimálním vstupním proudům a možnému velkému poměru  $U_{ref}$  ku vstupní nesymetrii není třeba vůbec přihlížet k detailním vlastnostem OZ: Dokonale vyhoví jakýkoli, i ten nejlevnější typ.

Napětí na inverujícím vstupu se vždy exponenciálně zvětšuje na pravé se vyskytující referenční úroveň na vstupu druhém. Při dosažení rovnosti  $U_C = U_{ref}$  se překlápi výstup komparátoru do opačné polohy, tím se mění i polarita  $U_{ref}$  a celý pochod se opakuje, rozdíl je pouze v opačné polaritě všech napěťových průběhů. Napětí na integračním kondenzátoru má vzhledem k  $U_{ref} \ll U_{vst}$  přibližně trojúhelníkovitý průběh, symetrický podle nulové napěťové osy. Kromě velmi dobré kmitočtové stability má zapojení pro praktické účely další vynikající přednost – opakovací kmitočet je za určitých podmínek nezávislý na napájecím napětí. Dokáže si tuto prakticky neznamou vlastnost jednoduchým výpočtem.

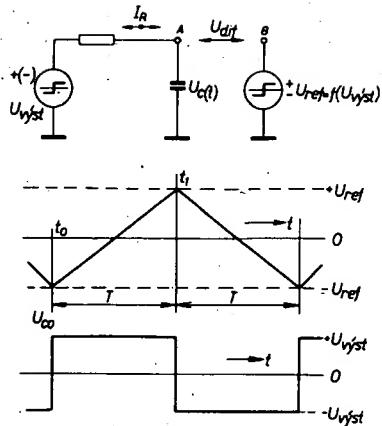
Za předpokladu  $A_v \gg (R_1 + R_2)/R_2$ ,  $U_{vst}/R_2 \gg$  proudová nesymetrie vstupu,

$$\frac{|U_{vst}|}{-U_{vst}} = 1,$$

které jsou nebo mohou být vždy splněny, můžeme určit poloviční dobu kmitu jako čas, potřebný k proběhnutí přechodového děje na jednoduchém obvodu  $RC$  s počáteční podmínkou  $|U_{C0}| = |U_{ref}|$ , viz obr. 71. Rovnice smyčkového proudu, odvozená z tohoto obrázku

$$-U_{C0} + I_R + \frac{1}{C} \int i dt = U_{vst} = 0.$$

(Polarita  $U_{C0}$  je vůči odpovídající okamžité hodnotě  $U_{vst}$  inverzní). Derivací rovnice



Obr. 71. Náhradní schéma pro výpočet doby překlopení komparátoru a idealizované průběhy

půdle času získáváme lineární diferenciální rovnici prvního rádu s konstantními součinítky

$$R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = 0,$$

jejímž řešením je

$$i = k e^{-\frac{t}{T}}.$$

Integrační konstanta vyplývá jak z fyzikálního pohledu, tak z první rovnice

$$k = I_0 = \frac{|U_{vyst}| + |U_{co}|}{R}$$

Okamžitá velikost napětí na integračním kondenzátoru v libovolném čase  $t < t_1$ , viz znova obr. 71,

$$U_C = U_{vyst} - U_R = U_{vyst} - (U_{vyst} + U_{co}) e^{-\frac{t}{T}}.$$

Napětí  $U_{co}$  a  $U_{C1}$  jsou vzhledem k diferenciálním vstupům OZ co do absolutní hodnoty velmi přesně shodná.

$$|U_{co}| = |U_{C1}| = U_{vyst} \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Potom z předchozího

$$\frac{U_{vyst} - U_{C1}}{U_{vyst} + U_{co}} = e^{-\frac{t}{T}},$$

$$e^{-\frac{t}{T}} = \frac{R_1}{R_1 + 2R_2}.$$

Logaritmováním dostáváme výraz pro polovinu dobu periody multivibrátoru

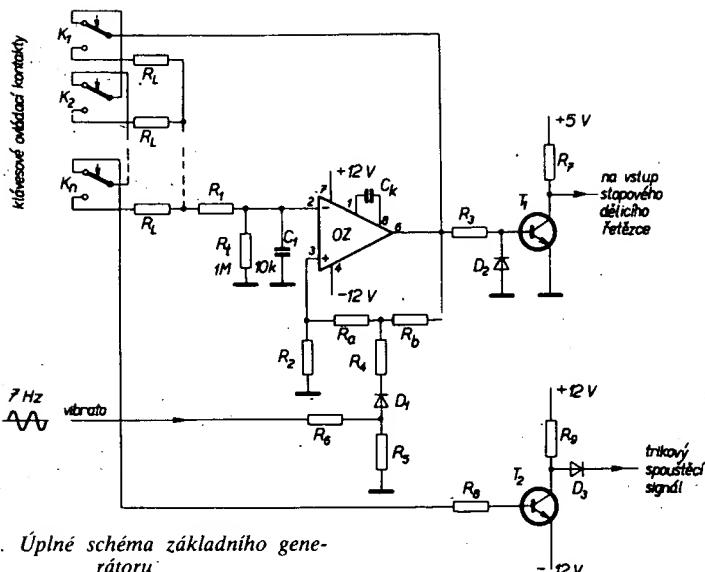
$$t = \tau \ln \left( 1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right).$$

Opakovací kmitočet je tedy

$$f = \frac{1}{2t} = \frac{1}{2RC \left( 1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right)}$$

Vidíme, že v poslední rovnici skutečně není vyjádřen vliv napětí  $U_{vyst}$  a tím samozřejmě ani napětí napájecího. Důvod je zřejmý, obě větve můstku jsou napájeny z jednoho napěťového zdroje, výstupu komparátoru. Jedinou podmínkou pro praktickou aplikaci je, aby obě saturační úrovne výstupu komparátoru byly přibližně symetrické. Tím automaticky musí být symetrické i obě větve napájecího napětí, čehož lze ovšem snadno dosáhnout i jednoduchou parametrickou stabilizací vhodně vybranou dvojicí stabilizačních diod. Absolutní hodnoty napájecího napětí ani jejich teplotní součinitel na opakovací kmitočet nemají žádný praktický vliv.

Aby mohl být generátor použit v nástroji, je třeba do obvodu vhodně vřadit ovládací kontakty pro volbu okamžitého požadovaného kmitočtu. Z rovnic vyplývá, že nejvhodnější je ovládat časovou konstantu  $\tau$  při zachování stabilní referenční úrovni. Z konstrukčního hlediska vyplývají dále požadavek



Obr. 72. Úplné schéma základního generátoru

použít spínací kontakty. Činnost je zřejmá z úplného schématu modifikovaného generátoru na obr. 72. Dalším problémem, jehož řešení je patrné ze zminěného schématu, je jak realizovat kmitočtovou modulaci (vibrátor) s ohledem na potřebný kmitočtový zdroj, linearitu a kmitočtovou stabilitu. Zvolil jsem způsob, při němž modulační signál působí na generátor pouze při jedné z referenčních úrovni (obr. 73). Na obr. 73a je idealizovaný průběh napětí na integračním kondenzátoru, odpovídající základnímu zapojení (obr. 70). Obě prahové (referenční) úrovni jsou co do absolutní hodnoty shodné. Bude-li se měnit jedna z nich, např.  $-U_{ref}$  (obr. 73b), mění se i opakovací kmitočet generátoru. Protože  $U_{ref} \ll U_{vyst}$ , je průběh napětí na integračním kondenzátoru velmi blízký lineárnímu, pilotitěmu, proto i  $\Delta t_a$ ,  $\Delta t_b$  jsou při malém zdvihu lineární funkci  $\Delta U_{ref}$ . Budeme-li pro zjednodušení uvažovat pouze dobu např. od  $-U_{ref}$  do  $+U_{ref}$ , pak platí (linearizováno)

$$t_{a2} = \frac{t_{a1}}{\sum U_{ref1}} \sum U_{ref2};$$

$$t_a + \Delta t_a = t_a \left( 1 + \frac{\Delta U_{ref}}{\sum U_{ref1}} \right).$$

Poměrná kmitočtová odchylka

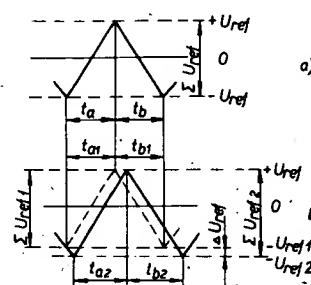
$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta U_{ref}}{\sum U_{ref1} + \Delta U_{ref}}.$$

Je-li  $\Delta U_{ref} \ll U_{ref}$  (tedy pro malé zdvihy, které připadají v úvahu), je

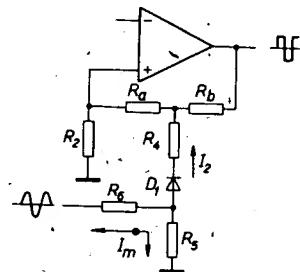
$$\Delta f = \frac{\Delta U_{ref} f_0}{\sum U_{ref1}}$$

lineární funkci napěťové odchylky referenčního napětí a tím je také poměrný zdvih  $\Delta f/f_0$  v celém rozsahu konstantní.

Praktickou realizaci osvětluje obr. 74. Horní odpor děliče pro získání referenčního napětí je rozdělen na dvě nestejně části,  $R_a$ ,  $R_b$ . Při kladné polaritě referenčního napětí pracuje multivibrátor běžným způsobem, při záporné je dělič navíc zatěžován proudem  $I_2$ , tečoucím smyčkou  $R_1$ ,  $D_1$ ,  $R_5$ . Referenční úrovni jsou tedy zájemně voleny nesymetrické. Pravidlo  $I_2$  je modulován napětím z generátoru vibrátoru, které přes děliče  $R_6$ ,  $R_7$  prichází i na diodu  $D_1$ . Děliční poměry je nastavena na úroveň kmitočtového zdvihu a současně upravována teplotní kompenzace, na níž se podílí teplotně závislé čelní napětí diody  $D_1$ . Budíci napětí pro kmitočtové rozmitání má velkou úroveň, aby bylo možno využít co největšího děličního poměru  $R_a/R_b$  a tím zajistit významnou nezávislost jednotlivých generátorů a minimální (nulovou) kmitočtovou odchylku průměrného kmitočtu modulovaného generátoru ve srovnání s přesně



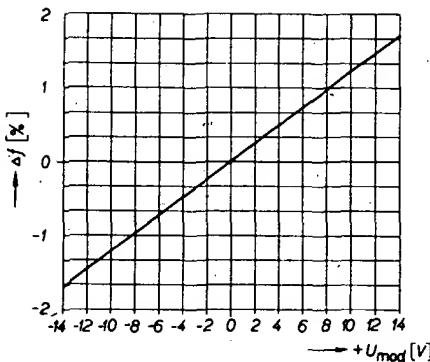
Obr. 73. K popisu kmitočtového rozložování posuvem jedné z referenčních úrovní



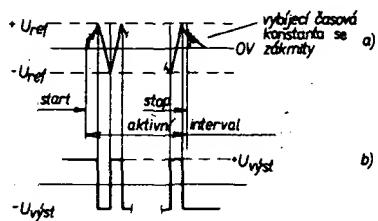
Obr. 74. Detailní úprava modulačního vstupu pro kmitočtové rozmitání

periodickým signálem (vypnutým vibrátem). Modulační (rozložovací) charakteristika uspořádání podle obr. 72 je na obr. 75. Modulační signál samozřejmě musí mít nulovou stejnosměrnou složku.

Vzhledem k tomu, že žádná generátorová jednotka není vybavena oddělovačem klíčů, musí se jejich vzniku zabránit již v základních generátorech. O této možnosti a o problémech, které s tímto řešením souvisejí, jsem se již zmínil. Právě uvažované zapojení může však jednoduše potlačit nežádoucí průvodní jevy při klíčování generátoru, což do značné míry kompenzuje větší náklady, spojené s realizací stabilního generátoru. Je nutno zamezit jakýmkoli přechodovým jevům a neperiodickým záklutům na počátku i při ukončení tónového intervalu v hledisku jak činnosti generátorů, tak mechanického zakmitávání kontaktů. Generátor musí být

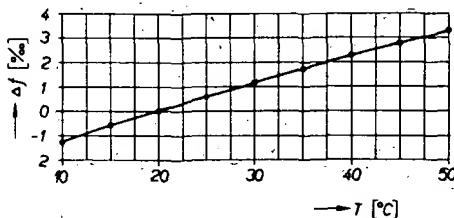


Obr. 75. Modulační charakteristika



Obr. 76. Příklad možných mezních stavů generátorů

připraven již po uvolnění klávesy k okamžitému generování prvního ze série impulsů, přesnému co do definice časů  $t_0$ ,  $t_1$ . Stejně tak při ukončení tónového intervalu se nesmí v této oblasti vyskytnout impuls s jinou dobou trvání, než jaká odpovídá generovanému kmitočtu. Právě k tomuto účelu je možno využít výstupního napětí OZ, které se pohybuje mezi kladnou a zápornou saturační úrovni. Je třeba pouze zajistit, aby na výstupu generátoru bylo při vypnutí v kterémkoli poloze a v kterémkoli okamžiku stejně výstupní napětí jako před vypnutím. Na výstupu generátoru tedy nesmí být nějaká definovaná základní nebo klidová úroveň napětí, na níž by se generátor vracel nebo kolem níz by zakmitával apod. Klidové výstupní napětí OZ naopak musí být náhodné, odvozené pouze od stavu, za něhož byl generátor vypnut. Této bistabilní činnosti je nutno dosáhnout i tehdy, uvažujeme-li zakmitávání jazyčkových kontaktů, vliv modulačního signálu vibrata a změny zatěžovacího proudu výstupu OZ. Je možná překvapující, že všechny uvažované požadavky je možno zajistit jediným odporem  $R$ , přemostujícím integrační kondenzátor (obr. 72). Tento paralelní článek  $RC$  má jedinou funkci – zajistit s určitou požadovanou časovou konstantou využití kondenzátoru  $C$  na nulové napětí. Tím je zaručeno, že výstup OZ setrvá v tom stavu, v jakém byl v okamžiku uvolnění klávesy. Vlivem zakmitávání kontaktu se sice integrační kondenzátor nabije kratičkými impulsy, ty se však vzhledem k vybíjecí časové konstantě  $R, C$  neuplatní a nestojí obvod překlopit. Pro všechny běžné typy kontaktů,



jaké jsem měl možnost ověřit, s rezervou vyhovovaly hodnoty, uvedené na obr. 72. Uprava zapojení má také příznivý vliv na stabilitu generátoru díky poměru  $I_{Ri} \gg I_{inv}$ . Činnost generátoru a jeho mezní stavů při uvádění do aktivního nebo pasivního režimu, včetně přípravy počátečních podmínek prvního impulsu, vyplývají z obr. 76.

Popsané zapojení umožňuje vzhledem k velké vlastní stabilitě a snadnému ladění s velkou rozlišovací schopností vyloučit jinak nezbytné ladící odpory trimry – ve vzorku byly jednotlivě tóny nastavovány paralelní kombinací vždy dvou výběrových odporů. Tim byly především odstraněny nestabilní prvky, jakými trimry bezesporu jsou, a dále byly omezeny náklady a požadavky na zá stavový prostor. Úprava, i když je v hudebních nástrojích zcela výjimečná, se plně osvědčila.

Realizovat generátor s kmitočtovou stabilitou řádu  $10^{-3}$  v oboru běžných teplot a klimatických podmínek samozřejmě vyžaduje určitá technologická opatření. Základním předpokladem reproducovatelnosti je především nutnost dodržet hodnoty a typy součástí, uvedených v seznamu součástek. Se způsobem kontroly OZ se ještě dále seznámíme. Odpory jsou (s přihlédnutím k vlastnostem a dostupnosti) typu TR 152. Jako vhodný typ kondenzátoru  $C_1$  se osvědčil jediný typ dostupný běžně v maloobchodní sítí – terylenový Remix. Na teplotní kompenzaci se kromě zapojení, úrovni referenčního napětí výběru prvků atd. podílí především teplotně závislé celní napětí-diody  $D_1$ ,  $D_2$  a tranzistoru  $T_1$ . Kompenzace je vzhledem k dobré vlastní stabilitě systému nenáročná a vztážena především k integračnímu kondenzátoru. Tímto způsobem byl dosažen reproducovatelný teplotní součinitel kmitočtové odchylky  $+1 \cdot 10^{-4}^{\circ}\text{C}$ .

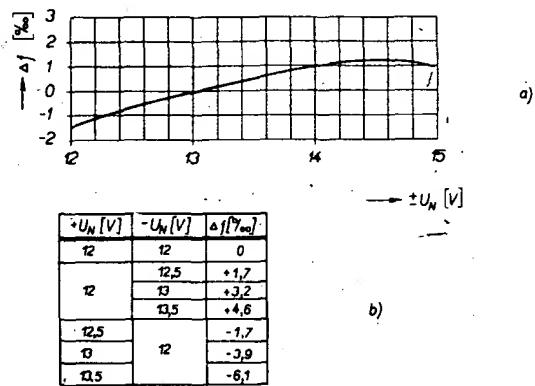
Závislost opakovacího kmitočtu generátoru na teplotě prostředí je na obr. 77, vliv změn napájecího napětí na kmitočet na obr. 78. Teplotní kompenzace, způsob výběru a formování některých součástí byly ověřovány měřením v improvizované teplotní komoře a teplotními šoky v rozsahu  $-10$  až  $+70$  °C. Dlouhodobá stabilita byla kontrolována průběžně na vzorku a po asi půl roce provozu nástroje, identifikované nepatrné odchylky souvisejí spíše s odlišnou teplotou prostředí.

Využití obou klidových úrovní  $\pm U_{\text{ys}}$ , v nichž obvod setrvává zcela náhodně, ztěžuje při respektování požadavku jednoduché spínací soustavy odvození spouštěcích impulů pro trikové obvody. V tomto ohledu je u každého generátoru nutno „zaplatit danou“ v podobě jednoho tranzistoru, zapojení je zřejmě z obr. 72. Ovládací systém využívá přepínacího kontaktu u každé klávaje, čímž se jednak zajišťuje požadavek – blokování vzniku falešného tónu a jednak umožňuje i ovládat trikový výstup. V klidové poloze je

sériovým propojením všech horních kontaktů připojován výstup OZ na proudově buzený spínač s tranzistorem  $T_2$ . Jeho činnost je založena na skutečnosti, že výstupní napětí OZ je vždy menší, než napajecí ( $\pm U_{ys} < \pm U_N$ ). Bližší pochopení vyplývá z rozboru vnitřní struktury výstupního obvodu OZ. Míra zmenšení napětí je funkci zatěžovacího odporu  $R_s$ . Touto cestou je tranzistor trikového výstupu v klidovém režimu buzen vždy do saturace, nezávisle na úrovni výstupního napětí. Při stisku klávesy, příslušející uvažovanému generátoru, přeloží se kontakt do spodní polohy, čímž se rozpojí obvod báze tranzistoru  $T_2$ , který se závírá. Z obou uvažovaných stavů vyplývají základní požadavky na vlastnosti tranzistoru: velký činitel  $\beta$  a  $U_{CE0} > 30$  V. Protože při pracujícím generátoru je kolektorové napětí tranzistoru kladné, rovně napějecímu, je možné sloučit trikové výstupy všech melodických generátorů jednoduchou diodovou součtovou logikou. Napěťová úroveň tohoto společného výstupu je omezena stabilizační diodou  $ZD_1$ , čímž je odstraněna závislost výstupního napětí na počtu právě pracujících generátorů. Navazující trikové obvody tedy reagují buď na jednotlivé tóny, hrané staccato, nebo na první ze série vázaných či akordických tónů. Spolehlivost uvedeného uspořádání je dokonala a teplotně nezávislá.

Součástí každé generátorové jednotky je kromě základního generátoru a výstupu pro tvorbu trikových signálů řetěz kmitočtových (oktaových) děličů pro získání příslušných stopových výšek. V popisované konstrukci je nutno kromě obvyklého oddělení generátoru a prvního děliče, zabraňujícího zpětnému působení, zajistit také převod různých napěťových úrovní výstupu OZ a vstupu TTL. Oba problémy je možno vyřešit použitím diody  $D_2$ , zabraňující překročení přípustného napětí v závěrném směru  $U_{EBmax}$  tranzistoru v interface. Z-kolektoru tohoto tranzistoru je již odebrán stopový signál  $2'$ . Vlastní nástroj je v melodické části čtyřstopý. Pro získání zbyvajících tří stop je užito čtyřbitové integrovaného děliče MH7493, jehož vnitřní organizace je typu 1 + 3 (tj. samostatný děličí stupeň a tříbitová kaskáda B, C, D). Výstupy jsou vždy typu Q, pro melodickou i basovou část je zapotřebí celkem pět pouzder. Skupina B, C, D jednotlivých pouzder je využita vlastními generátorovými jednotkami, tedy celkem pětkrát, šestému melodickému generátoru přísluší kaskáda děličů A, vytvořená ze zbyvajícího obsahu tří pouzder. Konečně zbyvající dva stupně A jsou využity basovou jednotkou, címž je umožněna široká variabilita basového doprovodu co do oktaové výšky a zvukového zabarvení. Základní basový generátor se kromě toho, že není opatřen modulačním vstupem pro vibrato a trikovým výstupem, koncepcně nijak neliší od již popsaného řešení.

Použití IO v dělicích stupních je vhodné,



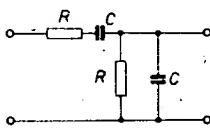
Obr. 78. Kmitočtová stabilita a napájecí napětí; a) průběh kmitočtové odchylky v závislosti na změnách přesně souměrného napájecího napětí, b) vliv nesymetrie

spolehlivé, jednoduché a zabírá málo místa, i když jsou velmi drahé. V krajním případě je možno nahradit MH7493 obvody MH7474, pak je účelné upravit melodickou část na třístopovou, čemuž odpovídá potřeba celkem sedmi pouzder 7474. Dále je možno vypustit děliče z basové jednotky. Taková řešení jsou ovšem nouzová, avšak možná. V žádném případě bych však děliče nedoporučoval stavět s diskrétními prvky, v dnešní době je to již skutečně technický anachronismus.

#### Generátor infravukového modulačního signálu

Jeho účelem je tvorba modulačních signálů pro vibrato a tremolo. Koncepce kmitočtového rozdílního zvětšení, zvolená u základních melodických generátorů, vyžaduje modulační signál symetrického průběhu s nulovou ss složkou. Pak je možno snadno splnit požadavky na minimální rozdílní signál průměrného generovaného kmitočtu při různých modulačních zvětšeních od nuly do maxima. Z tohoto hlediska se jako nejvhodnější jeví přímá vazba modulačního a modulovaného generátoru; zajistit vazbu obvyklým zapojením infravukového generátoru s fázovacími články je však nemožné, protože požadujeme modulační signál symetrický kolem nulové napěťové osy.

Pro praktickou konstrukci bylo zvoleno zapojení oscilátoru  $RC$  s Wienovým článkem. Jak můžeme snadno odvodit, Wienův článek (obr. 79) má napěťový přenos

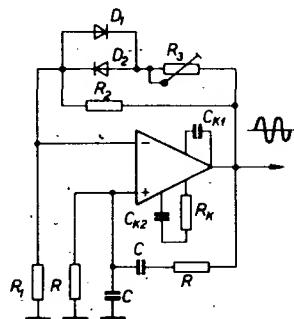


Obr. 79. Wienův článek

$$F_w = \frac{1}{3 + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$

kde  $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ . Platí-li  $\omega = \omega_0$ , pak přenos

$F = 1/3$ . Na tomtoto rezonančním kmitočtu má přenosová fázová charakteristika posuv  $180^\circ$ , vhodný pro splnění zpětnovazební oscilační podmínky. Aby měly harmonické kmity malé zkreslení, je nutné, aby součin  $\beta A$  nebyl větší než jedna. Zvolíme-li činitel  $\beta$  rovný přenosu Wienova můstku, tj.  $1/3$ , pak potřebné zesílení  $A$  aktívního prvku musí být přesně 3. Zesílení se u těchto oscilátorů proto kompenzuje ve smyčce záporné zpětné vazby, obvykle prvky s relativně velkou časovou konstantou (termistor, žárovka). To však má u velmi nízkých kmitočtů nežádoucí vliv na stabilitu a zkreslení signálu. Stačí si jistě uvědomit, že u většiny tónových generátorů tohoto typu je dolní



Obr. 80. Zapojení modulačního generátoru (7 Hz) s Wienovým článek a diferenčním zesilovačem

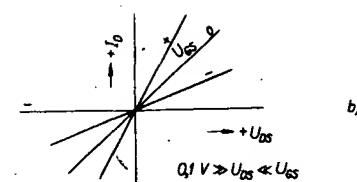
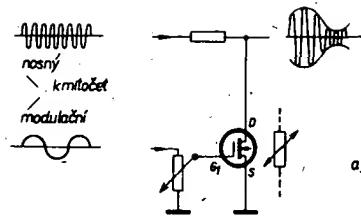
kmitočet v rozsahu 10 až 20 Hz. Z těchto důvodů je vhodnější, při zachování požadavků na kvalitu signálů, použít nelineární zpětnovazební smyčku. Schéma takto modifikovaného oscilátoru s OZ je na obr. 80. Wienův článek je zapojen ve smyčce kladné zpětné vazby. Záporná zpětná vazba má dvě charakteristické smyčky. První, základní, je upravena odpory  $R_1, R_2$  tak, aby reálné zesílení ze strany neinvertujícího vstupu bylo pro velmi malé výstupní úrovně větší než 3. Tím je bezpečně splněna podmínka oscilační. Při vyšších úrovních (přibližně při  $U_{vys} > \pm 0.6$  V) se zesílení aktívного prvku zmenší druhou, paralelní větví  $R_3, D_1, D_2$  ve smyčce záporné zpětné vazby. Změnou odporu  $R_3$  lze ovládat amplitudu výstupního signálu při zachování spolehlivé činnosti, což klasickou cestou není možné.

V konkrétní konstrukci byla použita tlačítková volba oscilační amplitudy ve třech stupních. Navíc při rozpojení všech tlačitek (vyřazení nelineární regulační smyčky) je možno získat výstupní signál přibližně lichoběžníkovitého průběhu (výrazně omezená sinusovka), který je pro některé aplikace zajímavý. Výstupní signál oscilátoru se užívá jak pro vibrato, tak pro tremolo s pevně nastaveným kmitočtem asi 7 Hz. Oba efekty je možno vypínat, užívat samostatně i v kombinaci. Se zapojením není třeba experimentovat, pracuje na první spuštění. Pouze jednotlivé úrovně výstupního napětí si musí úpravou odporu  $R_{168}$  až  $R_{170}$  (obr. 87 s. 117) nastavit každý podle svého výběru. Zapojení dává předpoklady i k jiným úpravám, o nichž jsme se již zmínili, včetně přelaďování atd. Za úvahu pak stojí i modifikace s jediným ovládacím prvkem (Hallův, Wigandův můstek) aj. Já však tyto komplikace považuji vzhledem k požadovaným vlastnostem nástroje za neúčelné.

#### Tvorba komplexního signálu

Prestože základní koncepce nástroje je založena na jistých omezeních, neznamená to v žádném případě, že tato skutečnost má být univerzální výhluvou, zdůvodňující horší parametry nástroje. Naopak, jediným důvodem této volby je umožnit stavbu solidního nástroje i méně zkušeným a méně majetným konstruktérům, při vytváření maxima možnosti, které systém skýtá.

Nástroj tohoto typu může konkurovat i mnoha složitějším nástrojům, např. kvalitou, rozsahem a pohotovostí volby zvukových základních nástrojů. Amatérská realizace jakostních rejstříků je komplikována nedostupností pohotových a přehledných ovládacích prvků pro rejstříkové sklopné přepínače, problémy s reprodukovatelností formantových filtrů, s přeslechy, odstupy rušivých signálů a polí. Při návrhu kmitočtového řešení jsem přihlížel i ke způsobu hry. Je evidentní, že levá ruka má kromě ovládání rejstříků již tak dost práce s basovým manuálem, ovládáním efektů a triků. Aby mohl být nástroj plně využíván, je preferován požadavek výrazného ovládání dynamiky a formantové polohy pedálem. Proto jsou obvody zvukového základního řešení rozděleny do dvou víceméně samostatných obvodů. Zde si všimněte prvního z nich, obvodu tvorby komplexního signálu. Jeho základem je lineární sloučování stopových výsek jednotlivých generátorů. Poměrně úrovne jednotlivých stop je možno libovolně upravovat pomocí balančních tahových potenciometrů, každé stopě dále přísluší jednoduchý vypínačový filtr  $RC$ , jehož pohotovým vybavením lze upravit původní pravoúhlý průběh na přibližně trojúhelníkovitý (s exponenciálními náběhy). Nastavením prvků, upravených na ovládacím panelu do přehledného celku, je v širokém rozsahu upravováno spektrální složení signálu, posouvaným znějící rozsah atd. Je třeba dodat, že

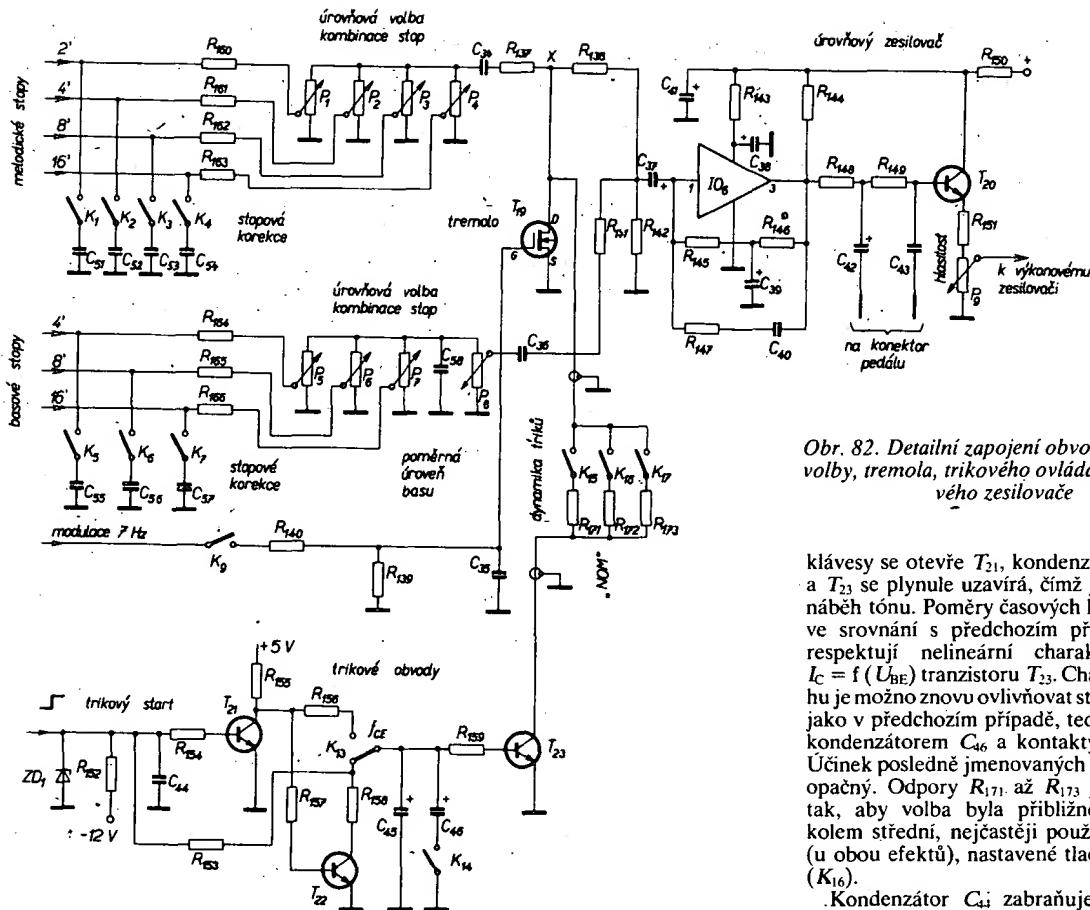


Obr. 81. Využití parametrické modulace AM pro tvorbu tremola; a) základní uspořádání (tranzistor MOSFET s vodivým kanálem), b) triodová (lineární) oblast výstupních charakteristik tranzistoru

i když tato úprava sama o sobě umožňuje výběr řady zvukových základních nástrojů, není vhodná pro pohotový způsob volby a také akustický projev nástroje není vyříbený, chybí mu malebnost a ušlechtilost. Proto jejím smyslem je především příprava vhodného spektrálního složení signálu pro korekční a formantové obvody pedálu, což zcela mění situaci. V tomto případě je pak třeba jen málokdy měnit nastavení tahových regulátorů a tlačitek během hry, převážná většina zásahů do charakteru zvukového základního řešení se děje pedálem. Protože druhá, pedálová regulace působí vlastně na úplný, komplexní signál, využívá nástroj jak registrativní syntézy, tak selektivního výběru, jejichž vzájemnou součinnost je možno ovlivňovat. Tím bylo dosaženo širokého rozsahu zvukových základních nástrojů při pohotovém ovládání a jednoduché konstrukci. Funkci pedálové části si popíše me dale.

#### Tremolo, trikové obvody

Komplexní signál melodické části, odebíraný ze společného výstupu balančních stopových regulátorů, je nejprve podroběn amplitudové modulaci obálky, čímž je vytvářeno tremolo (obr. 81). Modulace je parametrická, používá se polem řízený tranzistor, pracující v 1. a 3. kvadrantu výstupních charakteristik v triodové oblasti. Parametrem je úroveň polarizačního napětí hradla. Tranzistor tedy pracuje jako řízený odporník, jehož okamžitá hodnota se ovládá generátorem infravukového kmitočtu. Hloubku modulace je možno ovládat v širokých mezech úrovní modulačního napětí – příkladem může být napěťový dělič na obr. 81. Pro lineární a symetrickou modulaci musí být akustický signál zbaven ss složky, nejlépe kapacitním vazbou. Dalšími požadavky jsou především vhodné impedanční přizpůsobení modulačního obvodu rozsahu změn odporu kanálu elektroda D – elektroda S (kolektor – emitor) a minimální úroveň modulovaného signálu je zaručena automaticky respektováním požadavku lineární kompozice signálů jednotlivých stop a generátorů. Účinnost tremola je stejně jako u vibrata ovládána



Obr. 82. Detailní zapojení obvodů registrových volby, tremola, trikového ovládání a úrovňového zesilovače

klávesy se otevře  $T_{21}$ , kondenzátor se vybíjí a  $T_{23}$  se plynule uzavírá, čímž je upravován nábeh tónu. Poměry časových konstant jsou ve srovnání s předchozím případem jiné, respektují nelineární charakter proudu  $I_C = f(U_{BE})$  tranzistoru  $T_{23}$ . Charakter nábehu je možno znovu ovlivňovat stejnými prvky jako v předchozím případě, tedy přídavným kondenzátorem  $C_{46}$  a kontakty  $K_{15}$  až  $K_{17}$ . Účinek posledně jmenovaných prvků je však opačný. Odpory  $R_{171}$  až  $R_{173}$  jsou vybrány tak, aby volba byla přibližně symetrická kolem střední, nejčastěji používané polohy (u obou efektů), nastavené tlačítkem NOM ( $K_{16}$ ).

Kondenzátor  $C_{44}$  zabráňuje přeslechům spouštěcích signálů, které by se mohly přenášet do úrovňového zesilovače, je omezována štrmost jejich nábehových hran a vyzařovaná amplituda.

Po uvedeném zpracování se ná odporu  $R_{142}$  slouží signály melodické a basové části, dále zpracovávané společně. Hlasitost „levé ruky“ může být vzhledem k pravé libovolně nastavena tahovým logaritmickým regulátorem. Nastavený poměr již zůstává zachován.

Vibrato, tremolo i trikové efekty působí pouze na manuál pravé ruky, jak odpovídá přirozenému čtení.

#### Úrovňový zesilovač

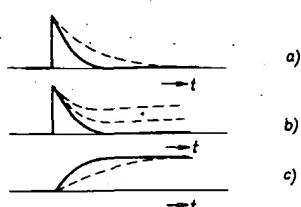
Pro zpracování signálu výkonovým zesilovačem je ho nutno nejprve mnohonásobně zesilat, o čemž si lze učinit představu jednoduchou úrovňovou rozvahou. S velkým napětovým zesílením bývají spojeny některé problémy, ať již s nastavením obvodu, zakmitáváním nebo stabilitou. V každém případě je pro naše použití nutno požadovat především velké zesílení, relativně přesně definované a reproducovatelné, vhodnou přenosovou charakteristikou a zanedbatelné přechodové zkreslení. Tím je při potřebné úrovni zisku vyloučena možnost použít levný OZ. Současně nesmí rozkmit napětí na výstupu v žádném případě přesáhnout úroveň  $\pm 5$  V, což je požadavek s ohledem na výkonový zesilovač. Na základě uvedených požadavků bylo zvoleno jednoduché zapojení s integrovaným obvodem  $IO_6$  (MAA125), který má pro tyto účely vhodné vlastnosti. Velký napěťový zisk obvyklých zapojení ( $A_v > 70$  dB), který bývá zdrojem obtíží, je v uvedeném zapojení naopak jednoduše využit k dosažení relativně velkého a reproducovatelného zesílení. Zapojení je rovněž na obr. 82. Má především dvě smyčky záporné zpětné vazby, stejněměrnou a kmitočtově nezávislou. Zesilovač má na vstupu vazební kondenzátor, aby bylo možno nastavit lineární režim obvyklou proudovou ss vazbou. Rozdíl proti běžným úpravám je

tlačítkovou volbou. Praktické uspořádání obvodu je na obr. 82.

Do stejného bodu jako elektroda D (kolektor) KF520 je zapojen i kolektor  $T_{23}$ , pracující jako ovládání výstupu trikového obvodu, tvořeného tranzistory  $T_{21}$  a  $T_{22}$ .

V klidovém stavu, kdy jsou uvolněny všechny klávesy melodické části, je  $T_{21}$  zavřen, jeho báze má závěrné předpětí  $-0,6$  V, určené proudem ze zdroje  $-12$  V přes odporník  $R_{152}$  stabilizační diodou v propustném směru (obr. 82). Na kolektoru  $T_{21}$  je tedy kladné napětí. Tranzistor  $T_{22}$  je v klidu naopak otevřen, na jeho kolektoru je přibližně nulové napětí. Podle polohy kontaktu  $K_{13}$  je možno hodnotit výchozí stav trikového obvodu, určený napětím na kondenzátoru  $C_{45}$ , které definuje proud kolektovým obvodem  $T_{23}$  a tím i míru přídavného tlumení modulačního obvodu (bod X).

Uvažujme nejprve, že je kontakt  $K_{13}$  v dolní poloze. Při stisku první klávesy je příslušným trikovým obvodem odpovídajícího generátoru vybaven spouštěcím impulsem, který přes součtu diodovou logiku a po omezení na Zenerovo napětí stabilizační diody způsobí změnu režimu tranzistorů  $T_{21}$  a  $T_{22}$ ;  $T_{22}$  se zavírá, kondenzátor  $C_{45}$  se nabije s počáteční časovou konstantou  $\tau_0 = R_{153}C_{45}$  na kladné napětí (přibližně  $+4$  V). Vybařovací tranzistor  $T_{23}$  pracuje v neobvyklém režimu. Pokud je trikový obvod pasivní, neuplatňuje se, protože při  $U_B = 0$  nemůže být při kolektovém napětí  $U_{CE} \ll 0,6$  V žádným způsobem aktivován. Kolektové napětí je však střídavé, mění svoji polaritu vůči nulové ss úrovni. V aktivním stavu tranzistor podle polarity okamžitého signálu pracuje jak v běžném, tak i inverzním režimu, směr kolektového proudu je různý. Proto-



Obr. 83. Časové průběhy trikových efektů; a) perkuse, b) volba doznení, c) nábehy

pouze ten, že ve smyčce zpětné vazby není odporový trimr, ale vybraný odpor  $R_{146}$ , kterým je možno kompenzovat tolerance jednotlivých obvodů. Pracovní bod zesilovače IO se nastaví tímto odporem tak, aby klidové napětí na výstupu (vývod 3) bylo přibližně polovinou napájecího napětí. Je-li  $R_{142} \ll h_{11}$ ,  $R_{148} \gg R_{144}$  a mají-li všechny uvažované prvky reálný charakter, pak není třeba řešit problém stability. Napěťový zisk je s několikaprocentní přesností roven poměru  $R_{147}/R_{142}$ , pokles dolní části přenosového pásmá je určen časovou konstantou  $R_{147}C_{37}$ , horní mezní kmitočet, který je řádu stovek kHz a nemusí být uvažován s parametry IO. Bude-li rozkmit výstupního napětí užíván v rozsahu výrazně menším než 0 až  $U_k$ , je i linearity zesilovače při  $A_u \ll A_0$  zcela vyhovující.

Výstup úrovnového zesilovače je přes odpory  $R_{148}$  a  $R_{149}$ , které jsou dílčími a oddělovacími prvky externích obvodů ovládání dynamiky a formantové oblasti, vedeni na emitorový sledovač s  $T_{20}$ . Jeho účelem je zajistit široký rozsah regulace pedálových funkcí a jejich vzájemnou nezávislost, což se vztahuje i na základní regulátor hlasitosti nástroje, kterým je tahový logaritmický potenciometr, zapojený jako emitorový odpor zmířeného sledovače. Z běže potenciometru je kapacitní vazbou přiváděn upravený signál již přímo do výkonového zesilovače. Před jeho popisem si však nejprve povšimněme elektrického řešení obvodu pedálu, tedy regulátoru dynamiky a korekční, popř. formantové oblasti.

#### Elektronika pedálu

Pedálové ovládání dynamiky a zvukového zabarvení nebývá u levnějších nástrojů časté. Přitom právě ve vybavení téměř funkci spočívá výrazná přenosnost elektronických nástrojů před klasickými. Především jednoduché nástroje (u nichž není možno předpokládat, že by byly běžně využívány s dolykovými zařízeními jako je dozvuk, ozvěna apod.), by měly být na rozdíl od běžné praxe jimi vybaveny. Předpokladem dobrého výsledku je především spolehlivost a dostatečně široký rozsah obou regulací. Elektrické schéma pedálu použitého v popisované konstrukci je na obr. 84. Regulace dynamiky je řešena způsobem, o kterém jsme se již zmínilí – optoelektronickým regulátorem s pohyblivou clonou. Tvarem clony je možno libovolně upravovat průběh regulace podle zvoleného mechanického způsobu ovládání.

Pedálový regulátor je dále druhou nedílnou součástí obvodu zvukového zabarvení nástroje. První, určenou pro přípravnou nebo méně často používanou regulaci, pracující na principu registrové syntézy, jsme se již zabývali. Získaná široká variabilita spektrálního obsahu signálu je předpokladem pro velmi dobrou činnost pedálu, která je účelovou modifikací selektivního výběru. Korekční nebo formantový článek působí v popisovaném zařízení na úplný signál. Protože základní kmitočtové polohy melodické i ba-

sové části nástroje jsou značně vzdáleny a při regulaci požadujeme, aby bylo zachováno odlišné zvukové zabarvení, musí být přenosová charakteristika korekčního článku relativně složitá. Při rozboru vlivu formantových oblastí na zvukové zabarvení snadno zjistíme, že kromě polohy formantové rezonance má výrazný vliv i její účinnost. Z hlediska regulátoru je zájem především o výrazná zabarvení. Ověřil jsem si, že při méně výrazné rezonanci je možno formantový filtr dobře simulovat jednoduchým článkem  $RC$ . Toho je využito při návrhu pedálu (obr. 84). Při sepnutém spínači se využívá předložení formantové rezonance – tak lze získat výraznou řadu zvuků, seřazených v přirozené návaznosti. Přenosové charakteristiky v závislosti na právě zařazeném kondenzátoru jsou na obr. 85a. Z grafu vyplývá, že melodická i basová složka signálu jsou ovlivňovány různě. Navíc se posouvá i minimum přenosové charakteristiky, čehož lze využít např. k simulování charakteru strunných nástrojů. Je-li spínač  $S_1$  rozpojen, jsou odpovídající přenosové charakteristiky na obr. 85b. Charakter signálu při ovládání v této poloze je plnější a bohatší, zvukové zabarvení je však typické pro elektronický nástroj. Po určité době náviku je možno pohotově a plynule volit nejrůznější zvuková zabarvení.

Formantový pedál lze ovládat buď přepínačem (radičem) sprázeným se šlapkou, nebo jazykovými kontakty, ovládanými pohyblivým trvalým magnetem. V druhém případě je nutno tvarem magnetu nebo jeho polového nástavce zajistit, aby byl vždy sepnut alespoň jeden magnet. Tím je zajištěn spojity charakter ovládání.

Celkové uspořádání obvodu zvukového zabarvení je mymí přátele – hudebníky oceňováno kladně a s časovým odstupem je ho možno doporučit. Přednosti z hlediska konstrukce je mimo jednoduchost i fakt, že formantové korekce ovlivňují signál velké amplitudy, čímž zcela odpadají obvyklé problémy s potlačením přeslechů a rušivých signálů. Přednosti je i snadná reproducovatelnost, protože v celém systému je použita jediná cívka.

#### Součástky v pedálu

##### Kondenzátory

$C_1$	68 nF, TC 180
$C_2$	22 nF, TC 181
$C_3$	10 nF, TC 183
$C_4$	4,7 nF, TC 184

žárovka 6 V/50 mA

fotoodpor  $R_f$  1,5 k $\Omega$ , WK 650 37

jazykové kontakty  $K_1$  až  $K_4$ , VNFR 817, nebo libovolné z výroby

$S_1$  libovolný spínač

formantová indukčnost  $L_1$  – vinuta na kostce z výrodejního transformátoru s plechy EI, průřez jádra

10 × 6 mm, drátem o  $\varnothing$  0,125 mm CuL byla původní kostička vyplněna bez prokladů; cívka má pouze tři vrstvy krycího izolačního papíru; indukčnost tlumivky je asi 0,8 až 1 H.

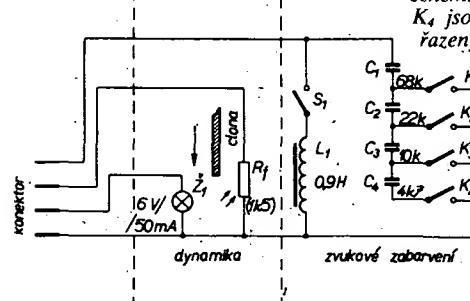
#### Výkonový zesilovač

Nástroj má vlastní výkonový zesilovač. Názory na nutné vlastnosti tohoto stupně se v mnoha ohledech rozcházejí: pokud jde o výstupní výkon, považují za minimální (vzhledem k dynamice) u výkonalých a polynormálních nástrojů k domácímu užívání výkon alespoň 10 W (sinus). Kmitočtový rozsah by měl být minimálně asi 30 až 10 000 Hz/3 dB, sám o sobě není kritický, je však obvykle v přímé souvislosti se zkreslením signálu, které je vůbec nejdůležitějším parametrem zesilovače (především přechodového a intermodulačního zkreslení). K běžným požadavkům patří stabilita a spolehlivost zesilovače včetně odolnosti vůči zkratu na výstupu. V souhrnu je možno konstatovat, že požadavky na výkonový zesilovač jsou prakticky v souladu s normami pro zařízení Hi-Fi. Lze tedy použít některý z řady známých zesilovačů. Ve výzvorku pracuje zesilovač, který jsem podrobne popsali v [17]. Dále popisované zapojení je jednou z možných úprav zesilovače, jedná se o symetrický dvojčinný zesilovač s přímou vazbou na zatežovací impedanci, napájený z nestabilizovaného zdroje (obr. 86).

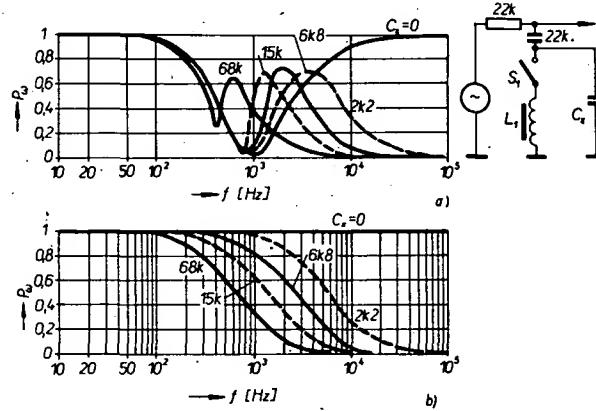
Aktivním prvkem napěťového zesilovače je OZ s velkým základním zářením  $A_0$ . Protože reálný zisk zpětnovazebního systému je malý – ve středu přenášeného pásmá je přesně definován poměrem

$$A_u [\text{dB}] = 20 \log \left( \frac{R_{122} + R_{120}}{R_{120}} \right),$$

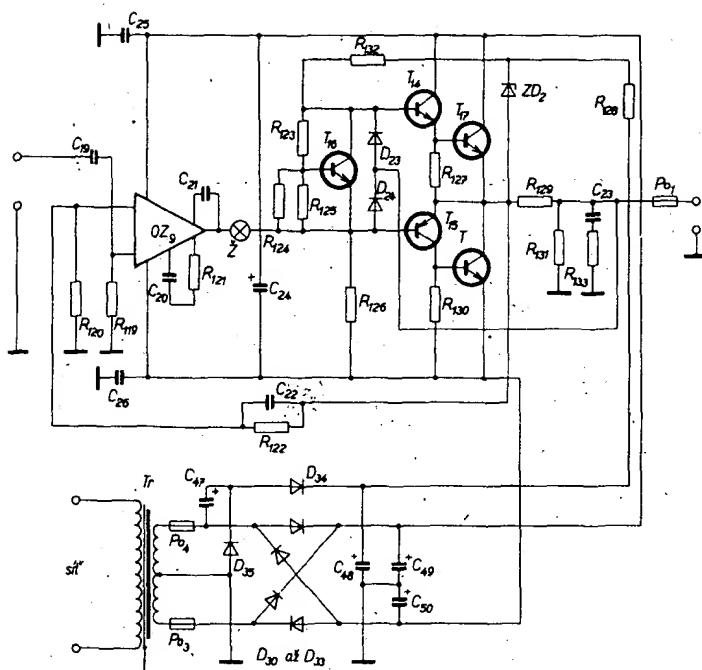
jsou dokonale potlačeny všechny nonlinearities, tolerance a tím i zkreslení. Účinnou zpětnovazební smyčkou jsou současně definovány parametry zesilovače. Protože vstupní napětí (díky předchozímu úrovnovému zesilovači) nemůže být v žádném případě větší než 0 až 5 V, je signál přiveden na neinvertující vstup bez úprav. Kmitočtové korekce OZ jsou navrženy podle běžných zásad. Výstup OZ napájí přes proudově závislý odpor (zárovka  $Z_1$ , zabraňující poškození OZ při zkratu na výstupu nebo při havárii výkonové části) dvojčinný výkonový zesilovací v kvazikomplementárním uspořádání. Základní předpětí k odstranění přechodového zkreslení klidovým proudem zajišťuje zpětnovazební regulátor s  $T_{16}$ , který díky tepelné vazbě s chladičem působí i jako teplotní regulátor klidového proudu. Zde je výhodné použít tranzistor KC147 (v plastickém pouzdru). Kmitočtová stabilita a přenosová charakteristika celého



Obr. 84. Elektrické schéma pedálu ( $K_1$  až  $K_4$  jsou ovládány – postupně –



Obr. 85. Náhradní schéma a přenosové charakteristiky pedálového ko- rektoru v závislosti na kapacitě  $C_x$



Obr. 86. Zapojení výkonového zesilovače a zdroje

zesilovače jsou zajištěny za všech možných pracovních podmínek součinnosti Bouchero-tova kompenzačního článku a kmitočtové závislé smyčky záporné vazby. Funkce i návrh tétoho obvodu; stejně jako obvodu k omezení výstupního proudu s diodami  $D_{3,4}$ ,  $D_5$  a s odporem  $R_{19}$ , byly popsány v [17].

Zesilovač je napájený z jednoduchého a nestabilizovaného symetrického zdroje. Sekundární napětí se dvoucestně usměrňuje a filtrace. Pomočné napětí pro předpěťový obvod zesilovače se získává zdvojovovačem napětí a omezuje stabilizační diodou  $ZD_2$  tak, aby byl vhodně nastaven průběh zatěžovacího proudu OZ v rozsahu rozkmitu jeho výstupního napětí. Aby se při havárii nebo při přetížení (zkratu) výkonového obvodu nezničily výkonové tranzistory, je zdroj opatřen dvěma pojistkami v obvodu sekundárního vinutí. Tak je v součinnosti s omezením výstupního proudu koncového stupně levně zajištěna účinná ochrana celého zesilovače. Předností zapojení je vedle dobrých a definovaných parametrů i snadná reprodukovatelnost, jednoduchá konstrukce a oživení. Vzhledem k podrobnému popisu návrhu i konstrukce zesilovače v [17] se jím dále nebudeme zabývat.

### Celkové schéma nástroje

Nyní si můžeme popsat úplné elektrické schéma nástroje (obr. 87). Zde je již respektováno rozdělení elektroniky na tři desky s plošnými spoji, které vyplnulo z konstrukčních pozadávků.

Na desce 1 jsou obvody základních generátorových jednotek melodické i basové části, společné obvody pro trikový generátor, generátor 7 Hz, kompletní výkonový zesilovač kromě snímacího a výkonových tranzistorů (které jsou umístěny na zadním panelu) a zdroje  $\pm 12$  V,  $+5$  V. Tato deska je nosnými profily upvevněna na dřevěné desce, tvořící základní část nástroje.

Na desce 2 jsou obvody tremola, trikový systém a úrovnový zesilovač. Tato deska je upevněna na horním, ovládacím panelu.

Na desce 3. upevněné rovněž na základním šasi, je pouze zdroj pro výkonový zesilovač.

Ostatní obvody a součásti z celkového schématu, které jsou zakresleny mimo uvedené desky (jako např. sítový transformátor a některé odpory a kondenzátory) jsou uloženy buď na základním šasi, nebo horním či zadním panelu.

Z celkového schématu je podle předchozího popisu dílčích obvodů zřejmá činnost celého nástroje. Způsob propojení desky 1 s ovládací kontaktovou sběrníkem je patrný z obr. 88. Pro lepší orientaci je na obr. 89 uspořádán horního ovládacího panelu, z něhož vyplývá rozložení a součinnost jednotlivých prvků.

Konstrukční úprava tahových potenciometrů a tlačítek stopových filtrů  $RC$  umožňuje snadné a přehledné ovládání registrové syntézy hudebního signálu jak melodickej, tak basové části. Balanční regulátory jsou logaritmické, protože však pracují do zatěžovacího odporu, tvořeného jejich paralelní kombinací  $R_1 \ll R_2$ , vyhovuje průběh regulače všem požadavkům. Rozložení regulačních prvků odpovídá poloze melodickej i basové části manuálu a zaujímá asi 2/3 pravé části panelu (předpokládá se pouze výjimečné ovládání během hry). V levé třetině nástroje jsou tlačítka volby a ovládání efektů a triků. Předpokládá se ovládání levou rukou, která je při hre méně zaměstnaná.

Horní řada pěti spinacích tlačítek (obr. 89) je určena pro trikové efekty. První tlačítko zleva (TRIK, ve schématu  $K_{13}$ ) určuje charakter triku. Druhé (+T, ve schématu  $K_{14}$ ) při vybavení prodlužuje časovou konstantu zvoleného průběhu. Následující tři tlačítká (MIN, NOM, MAX, ve schématu  $K_{15}, K_{16}$  a  $K_{17}$ ) definují dynamický rozsah triku, jsou společná pro oba základní efekty. Imitace jazyčkových náběhů i perkuse jsou svým charakterem vhodným doplňkem nastroje, je ovšem třeba si na jejich užívání zvyknout. Z mé zkušenosti vyplývá, že napoprvé jich nikdo nedokáže správně využít. Pro úplnost dodejme, že „TRIK“ je výrazen při uvolnění všechny tři posledně uvedené tlačítka

všechny tři poslední jmenované úsekce.

Spodní řada spínacích tlačítek slouží k ovládání a vyvobavání efektů. První (VIBR., ve schématu  $K_5$ ) zapíná a vypíná vibrato. Ve vypnutém stavu jsou modulační vstupy generátorů 1 až 6 spojeny s kostrovní

přes společný odpór  $100\ \Omega$ , srovnatelný s vnitřním odporem zdroje modulačního kmitočtu  $7\ \text{Hz}$ , čímž je zajistěna minimální kmitočtová odchylka při přepnutí. Druhé tlačítko (TREM, ve schématu  $K_4$ ) vybavuje efekt tremola. Následují opět tři ovládací tlačítka úrovně efektů (MIN, NOM, MAX, na schématu  $K_{10}$ ,  $K_{11}$  a  $K_{12}$ ), která znova slouží současně pro oba efekty, podle toho, který je zvolen. Tlačítka se volí úroveň oscilační amplitudu modulačního generátoru a tím i účinnost vibrata (poměrná hodnota modulačního zdvihu). Tlačítky je současně volena úroveň modulačního napětí pro fidiční elektrodu  $T_{1a}$ , tedy hloubka amplitudové modulace komplexního melodického signálu (účinnost tremola). Systém volby umožňuje jak samostatně použít vibrato nebo tremolo, tak i jejich kombinaci. Hodnotami součástí je ve třech stupních určen vzájemný poměr obou efektů, při uvolnění všech tří tlačítek se získá mimořádně účinný čtvrtý stupeň, kdy má modulační signál lichoběžníkovitý průběh. Rovněž tento stupeň může být užit u jednotlivých nebo kombinovaných efektů.

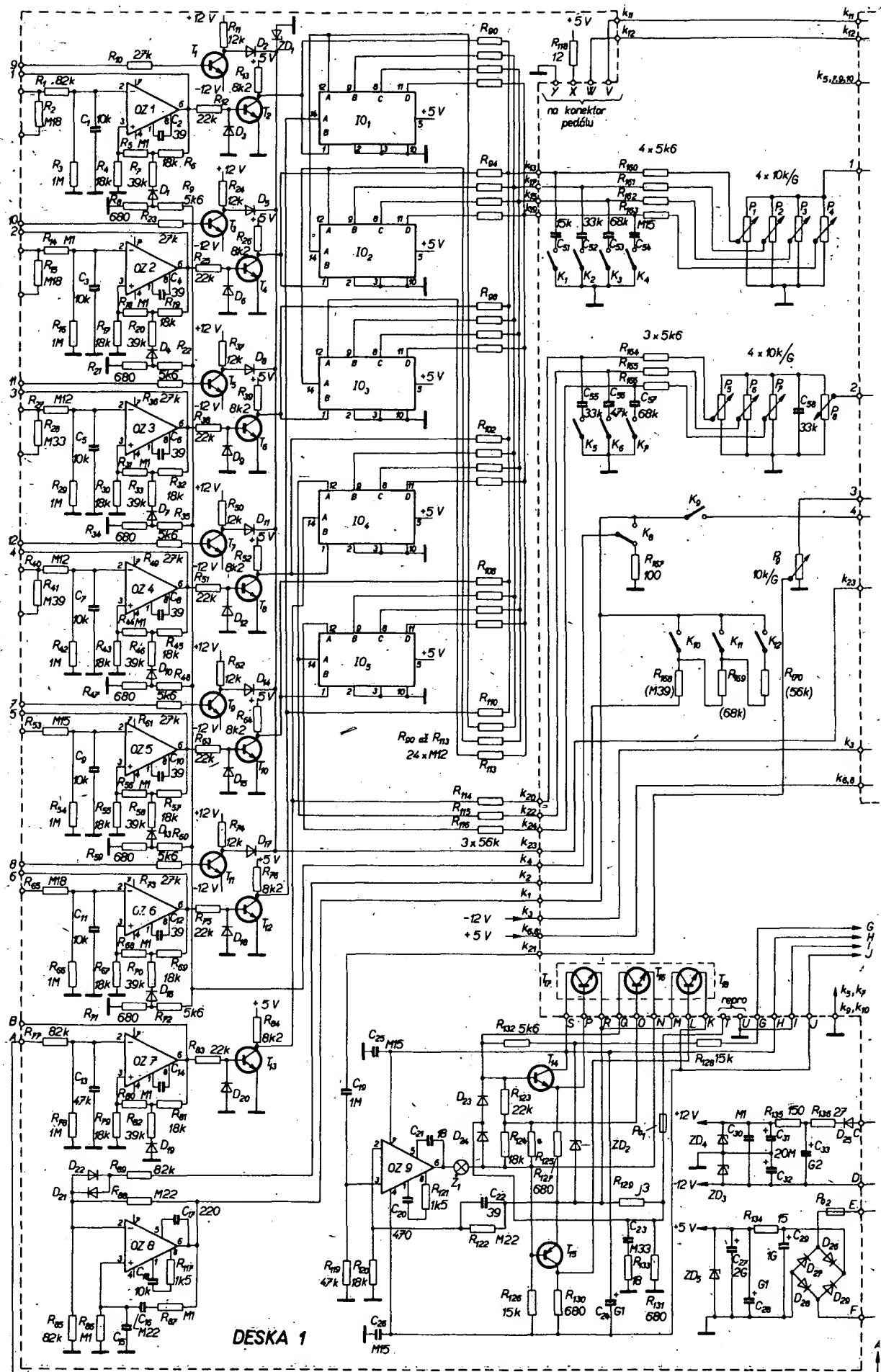
Na panelu jsou ještě umístěny tahové potenciometry **BAS** (určující poměr hlasitosti basového doprovodu k melodické části skladby) a **HLASITOST** (jímž se upravuje možná horní hranice dynamického rozsahu nástroje). Oba tyto prvky jsou na rozdíl od předchozích ovládány v horizontálním směru, z čehož je na první pohled zřejmá jiná funkce.

Jako tlačítka byly použity tlačítkové spínače Isostat. Na panelu již nejsou žádné další ovládání prvků.

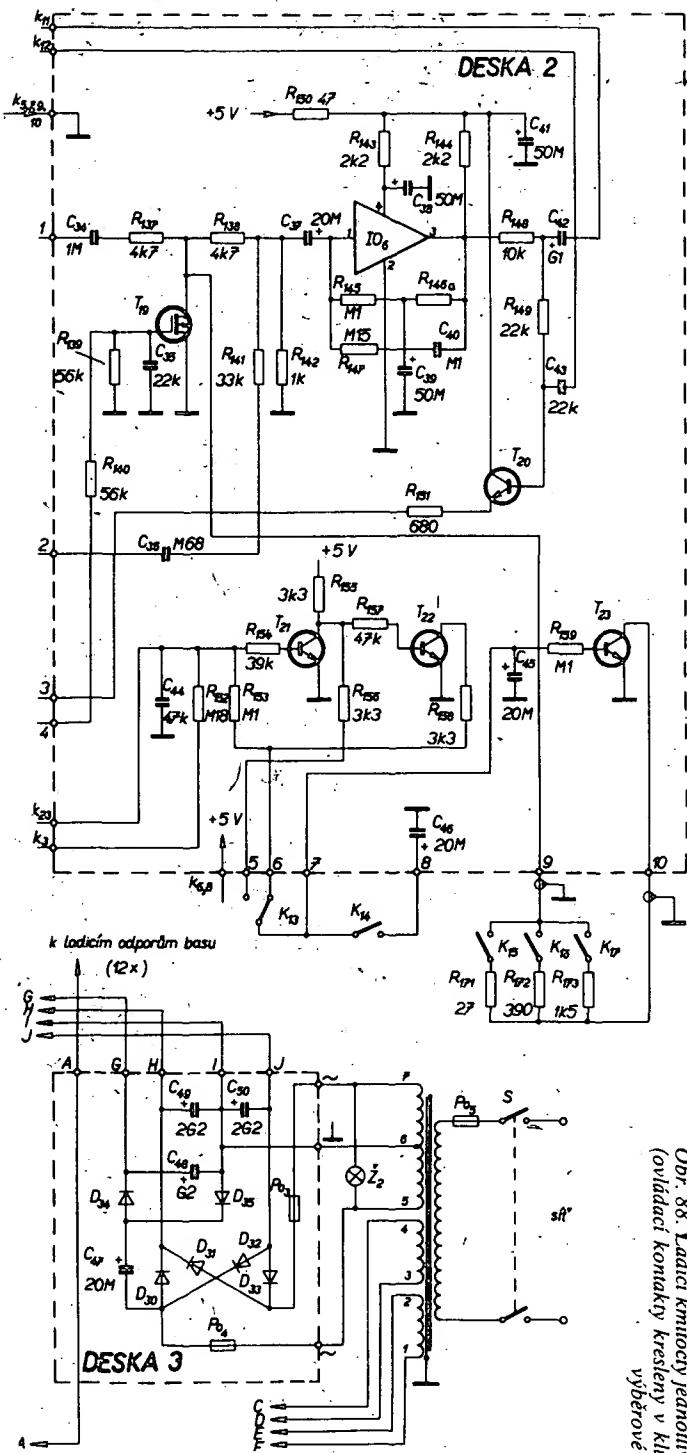
Funkci generátorových jednotek, infra-zvukového generátoru, tremola, trikových obvodů a úrovnového zesilovače jsme si již podrobně probrali. Signál z úrovnového zesilovače je po úpravě pedálem zaváděn na výkonový zesilovač. Maximální úroveň tohoto signálu je upravena tak, aby ani při plném zesílení všech regulátorů nemohl být při jmenovité zátěži ( $4\Omega$ ) zesilovač přetížen. t.j. omezen výstupní signál: maximální nezkradený výstupní výkon je asi 16 W. Bude-li zatěžovací odpor z nějakého důvodu menší, bude zesilovač ve špičkách limitovat, což lehce poznáme sluchem, jinak se však nestane nic. Při případném zkratu na výstupu se přeruší obě pojistky ve zdroji ( $P_1$ ,  $P_2$ ). Výstupní tranzistory jsou izolovány upvněny na zadním, masivním hliníkovém panelu takže nehrází nebezpečí jejich zničení překročením povolené pracovní teploty.

Pokud jde o přeslechy a odstup užitečného signálu, jsou vlastnosti nástroje, díky koncepti a malým impedancím obvodů s malou úrovňí signálu, velmi dobré. Jedinou potíží jsem měl s přeslechy stopových signálů do smyčky záporné zpětné vazby výkonového zesilovače, což bylo způsobeno nepozorností při návrhu desky s plošnými spoji. Na publikované desce je již tento nedostatek odstraňen.

Za povšimnutí snad ještě stojí zapojení zdrojů, které jsou v nástroji celkem tři, všechny v úsporném provedení. Zdroj pro výkonový zesilovač byl již popsán. Jako filtracní kondenzátory byly použity typy Siemens B 7228 – 2G2/40 V, které mohou být nahrazeny např. typy TESLA TE 676. Zdroj pro napájení OZ je jednoduchý, s jednocestným usměrněním a stabilizací dvojicí vybraných diod typu 6NZ70. Symetrickou obou napájetí je jedinou, avšak důležitou podmírkou správné činnosti. Maximální odchylka musí být menší než 0,2 V, pro výběr stačí měření běžným voltmetrem při stálém proudu vybranými diodami. Absolutní velikost obou napájetí není kritická a může se poohybovat v rozsahu asi 11 až 13 V. Rovněž zdroj +5 V je jednoduchý, po usměrnění Graetzovým můstkem se ss napětí filtrace a stabilizuje vybranou diodou 1NZ70 se Zenorovým napětím menším než 5,3 V. Dioda je opatřena



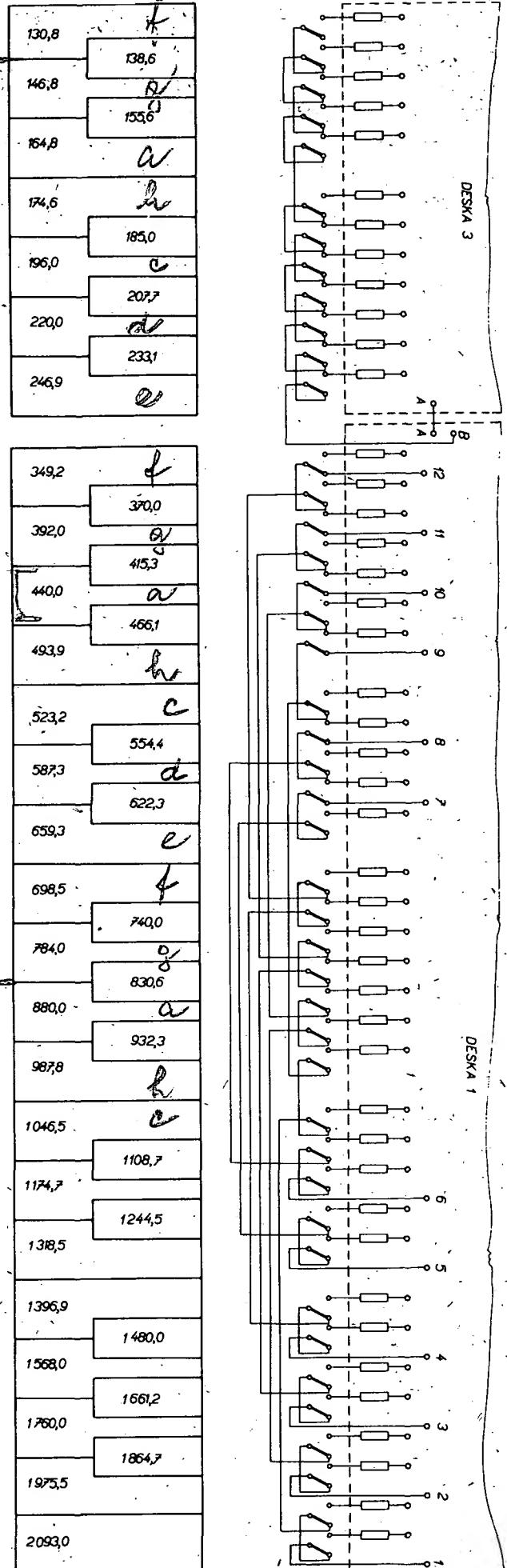
Obr. 87. První část celkového schématu přístroje

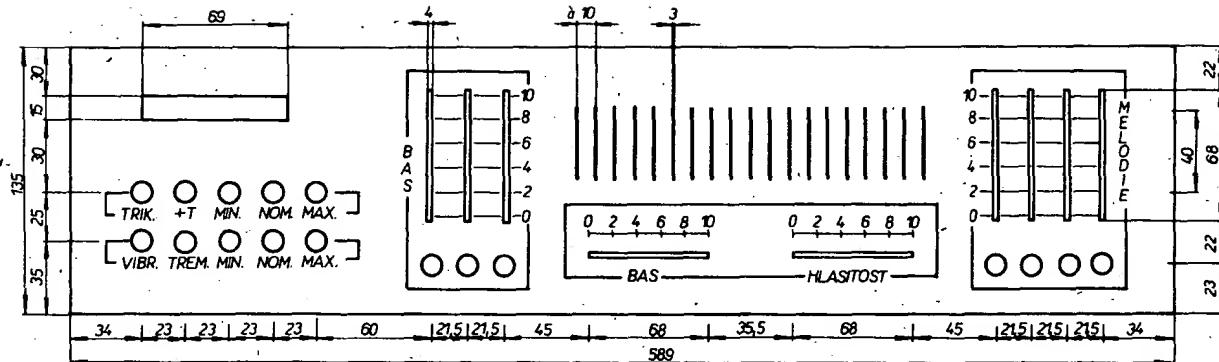


Obr. 87. Druhá část celkového schématu přístroje

na jednoduchým hliníkovým chladičem. Zdroj  $\pm 5$  V je chráněn tavnou pojistkou, zdroj  $\pm 12$  V je chráněn způsobem zapojení (odpor  $R_{136}$  v sérii s diodou  $D_{25}$ ). Síťový transformátor musí být proto, že výkonový zesilovač pracuje bez stabilizace napájecího napětí, poměrně přesně dimenzován. Napájecí napětí pro výkonový zesilovač nesmí být větší než  $\pm 18$  V, a to ani při provozu naprázdně, ani s ohledem na tolerance síťového napětí. Při návrhu je vhodné počítat se stejnosměrným napětím přibližně 15 až 16 V (naprázdně), volit dostatečně dimenzované jádro i průměr drátu sekundárního vinutí. Na primárním vinutí je možné vyvést odbočky

Obr. 88. Ladicí kmitočty jednotlivých kláves, zapojení kontaktorové sběrnice a ladících odporek (ovládací kontakty kresleny v klíčových polohách, kmitočty jsou v Hz, jako odpory slouží výběrové ladici kombinace  $R_A$ ,  $R_B$  – viz text)





Obr. 89. Orientační rozměry, popis a rozložení prvků ovládacího panelu (průměry vrtaných děr jsou 12,5 mm)

a jejich využitím pak upravit napájecí napětí pro výkonový zesilovač při jmenovitém síťovém napětí (220 V) na požadovanou velikost.

To je asi vše, co je třeba uvést k celkovému schématu. Ostatní skutečnosti již dostatečně vyplýnuly z popisu dílčích obvodů.

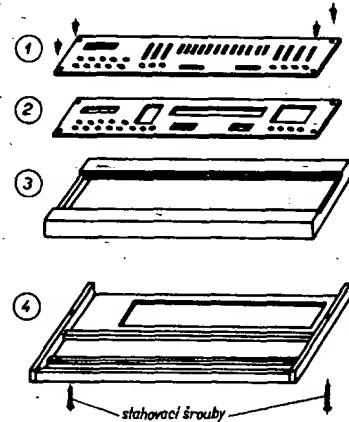
### Vlastní konstrukce nástroje Mechanická koncepce

Elektrické parametry nikdy nejsou jedinými vlastnostmi zařízení, které je třeba kriticky hodnotit. U hudebních nástrojů to platí především. Naším cílem je konstrukce malého a spolehlivého nástroje, který by ve své kategorii dosahoval nejlepších výkonů. Elektronická část k tomu dává dobré předpoklady. Možnosti mechanické úpravy je jistě celá

řada, pro minimální rozměry nástroje se však jeví jako výhodné použít akordeonové klávesy a plochou skříň s ovládacím panelem shora. K tomu je právě vhodný ovládací systém s tahovými potenciometry a s tlačítky. Samozřejmými požadavky na konstrukci jsou jednoduchost, snadná montáž, robustní provedení a konečně i dobrý přístup k jednotlivým dílům vzhledem k případným opravám. Stejný cíl sleduje i požadavek jednoduché demontáže všech dílů, včetně manuálu a sběrnice.

Zvolené řešení je na obr. 90. Nástroj se skládá ze dvou částí, ze spodního (základního) a z horního dílu, což je kromě jiného výhodné i pro rozložení práce. Elektrické propojení obou částí zajišťuje jediný konektor.

(Dokončení v AR B4/77)



Obr. 90. Mechanická koncepce nástroje; 1 – ovládací panel, 2 – subpanel, 3 – horní díl skříně, 4 – spodní díl, základní šasi

### VYŘIZUJEME ZÁSILKOVÝ PRODEJ NA DOBÍRKU

všech objednávek

od obyvatelstva i organizací v ČSSR, které došly přímo na naši prodejnu, nebo prostřednictvím n. p. TESLA ROŽNOV a TESLA LANŠKROUN, v sortimentu:

**VAKUOVÁ TECHNIKA**, polovodičové prvky, integrované obvody, hybridní integrované obvody, displeje a svíticí diody;

**PŘÍRUČNÍ KATALOGY**, konstrukční katalogy a obchodně technická dokumentace;

**SERVISNÍ A TECHNICKÁ DOKUMENTACE** na všechny finální výrobky spotřební elektroniky TESLA, pokud je má prodejna na skladě;

**KOMPLETY SOUČÁSTEK** včetně desek s plošnými spoji podle návodů na zařízení, publikovaných v časopise AMATÉRSKÉ RÁDIO, řada A a B, pokud je tak v daném článku uvedeno. Jednotlivé součástky prodáváme při osobním odberu přímo v prodejně;

**OSTATNÍ SORTIMENT** zboží zasíláme na dobríku jen tehdy, má-li prodejna volnou pracovní kapacitu. Nevyřízené objednávky postoupíme ZÁSILKOVÉ SLUŽBĚ TESLA, UHERSKÝ BROD, PSČ 688 19, Za dolním kostelem 847.

ZÁJEMCE Z PARDUBIC A OKOLÍ ZVEME K OSOBNÍ NÁVŠTĚVĚ naší prodejny. Ochotné předvedeme veškeré zboží – od televizorů přes gramofony, magnetofony a další finální výrobky až po drobný sortiment pro radioamatéry, kutily i profesionály – ti všichni mají možnost pohodlného výběru podle vzorkovnic!

**služby**  
**PARDUBICKÉ**

**PRODEJNY TESLA**

PORADENSKÁ SLUŽBA AMATÉRŮM I ORGANIZACÍM PŘEZKUŠOVÁNÍ VÝROBKŮ TĚŽ PŘED ZÁKZNÍKEM PŘI PRODEJI! DŮKLADNÉ ZAHOŘOVÁNÍ TELEVIZORŮ PŘED JEJICH PRODEJEM!

**NAŠE SPECIALIZACE A PŘÍMÉ DODÁVKY:** elektronické měřicí přístroje tuzemské i z dovozu podle vzorků n. p. TESLA BRNO, polovodičové prvky a vakuová technika podle vzorků n. p. TESLA ROŽNOV, součástky pro elektroniku podle vzorků n. p. TESLA LANŠKROUN.

**NAŠE ADRESA:**

značková prodejna TESLA, Pardubice PSČ 530 02, Palackého 580.

Reproduktoři

Mikrofony

Zesilovače

Konektory

Polovodiče

Elektronky

Odpory

Kondenzátory

Televizní antény

Speciální prodejny

RADIOAMATÉR

PRAHA 1, Žitná 7  
PRAHA 1, Na poříčí 44



DOMÁCÍ POTŘEBY  
PRAHA